



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**STUDI KASUS AKIBAT PEMASANGAN SISFCL (*SATURATED
IRON-CORE SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT
LIMITTER*) DI PT. PUPUK KALIMANTAN TIMUR II (PKT II)**

Muhammad Firman Setiawan
NRP 2213 105 062

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Feby Agung Pamuji, ST ., MT

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**CASE STUDIES DUE TO INSTALLATION OF SISFCL
(SATURATED IRON-CORE SUPERCONDUCTING FAULT
CURRENT LIMITTER) AT PT. PUPUK KALIMANTAN TIMUR
II (PKT II)**

Muhammad Firman Setiawan
NRP 2213 105 062

Advisor
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Feby Agung Pamuji, ST., MT.

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Fakulty of Industrial Teknologi
Sepuluh Nopember Institute of Teknologi
Surabaya 2015

**STUDI KASUS AKIBAT PEMASANGAN SISFCL (SATURATED
IRON-CORE SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITTER)
DI PT. PUPUK KALIMANTAN TIMUR II (PKT II)**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

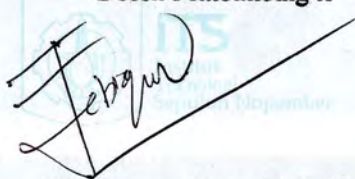
Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
NIP. 196603181990101001

Dosen Pembimbing II



Feby Agung Pamuji, ST., MT.
NIP. 198702062012121002



Studi Kasus Akibat Pemasangan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*) di PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II)

Nama : Muhammad Firman Setiawan
NRP : 2213105062
Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Pembimbing II : Feby Agung Pamuji, ST., MT

ABSTRAK

Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) telah diintegrasikan sejak tahun 2009 untuk meningkatkan kontinuitas dan keandalan sistem bagi seluruh plant. Sehingga terdapat penambahan beban dan pembangkit baru. Penambahan beban dan pembangkit baru akan memberikan arus hubung singkat yang besar pada kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II). Saat terjadi arus gangguan hubung singkat $\frac{1}{2}$ cycle pada switchgear PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II), arus gangguan tersebut melebihi rating kapasitasnya, dimana kapasitas ratingnya sebesar 37.8 kA peak, sedangkan arus hubung singkat $\frac{1}{2}$ cycle pada switchgear sebesar 67.41 kA peak. Oleh sebab itu digunakan pemasangan SISFCL untuk membatasi arus hubung singkat tersebut. pemasangan SISFCL ini dipasang pada feeder transformator TR-K2-02 dan feeder generator GTG-K2, dimana feeder-feeder ini yang menyumbangkan arus hubung singkat terbesar. Akibat pemasangan SISFCL ini dapat mengurangi besarnya arus hubung singkat dari 67.41 kA peak menjadi 35.751 kA peak. Pemasangan SISFCL menunjukkan arus hubung singkat semakin berkurang sehingga mengakibatkan perubahan koordinasi proteksi arus lebih. Studi koordinasi ini digunakan untuk mengetahui sistem kelistrikan ini apakah sistem pengamannya bekerja dengan baik. Hasil analisa ini ditampilkan dalam bentuk kurva time current characteristic (TCC)

Kata Kunci : arus hubung singkat, SISFCL, Koordinasi proteksi, rele arus lebih, Kurva time characteristic (TCC)

***Case Studies Due To installation of SISFCL (Saturated
Iron-core Superconducting Fault Current Limiter) on PT.
Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II)***

Name : Muhammad Firman Setiawan
NRP : 2213105062
Lecture I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Lecture II : Feby Agung Pamuji, ST., MT

ABSTRACT

Electrical systems PT Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) has been integrated since 2009 to improve the continuity and reliability of the system for the entire plant. So that there is additional load and new generation. The addition of the load and the new generation will provide a large short circuit currents in the electrical PT. East Kalimantan fertilizer II (PKT II). When there is a short circuit currents fault $\frac{1}{2}$ cycle in switchgear PT. East Kalimantan fertilizer II (PKT II), the fault current exceeds the rating capacity, where the capacity of its rating of 37.8 kA peak, while the short circuit current in the switchgear $\frac{1}{2}$ cycle of 67.41 kA peak. Therefore, using mounting SISFCL for limiting the short circuit current. SISFCL installation is mounted on the feeder transformer TR-K2-02 and feeder generator GTG-K2, where feeder-feeder who supply the largest short-circuit current. Due to the installation of this SISFCL can reduce the amount of short circuit current of 67.41 kA peak into 35 751 kA peak. Installation SISFCL cause short circuit current decrease and make a different coordination overcurrent protection. This coordination studies are used to determine whether the electrical system works well. The analysis results are displayed in the form of current-time curve characteristic (TCC)

Key words : short circuit current, SISFCL, protection coordination, relay over current, curve time characteristic (TCC)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, terucap syukur kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, berkah dan karuniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “STUDI KASUS AKIBAT PEMASANGAN SISFCL (*SATURATED IRON-CORE SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITTER*)”. Tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar sarjana teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan yang berbahagia ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah berjasa dalam proses penyusunan tugas akhir ini, yaitu :

1. Allah SWT atas karunia, berkah dan rahmatnya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua penulis, Ir.H. Eddy Gunawan, MT dan Dra.Siti Inhidayati, serta ketiga saudara penulis Edwin, nina dan maya atas dukungan, dorongan semangat dan doa untuk keberhasilan penulis.
3. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT. Dan Bapak Feby Agung Pamuji, ST ., MT Selaku dosen pembimbing yang dengan sabar telah memberikan saran, masukan serta bimbingannya.
4. Inas Khoirunnisa yang telah memberikan doa dan dukungannya kepada penulis.
5. Deny Cahyo, Yohanes sabriant, dan angga atas kerjasama,dukungan, dorongan semangat, diskusi dan telah menjadi sahabat selama proses pengerjaan tugas akhir.

Besar harapan penulis agar buku ini dapat memberikan manfaat bagi banyak pihak, sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran membangun dari seluruh pembaca.

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| HALAMAN JUDUL | |
| PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR | |
| LEMBAR PENGESAHAN | |
| ABSTRAK | i |
| ABSTRACT | iii |
| KATA PENGANTAR | v |
| DAFTAR ISI | vii |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| DAFTAR TABEL | xiii |
| BAB 1 PENDAHULUAN | |
| 1.1 Latar Belakang Masalah | 1 |
| 1.2 Permasalahan | 1 |
| 1.3 Batasan Masalah | 2 |
| 1.4 Tujuan dan Manfaat | 2 |
| 1.5 Metodologi | 3 |
| 1.6 Sistematika Penulisan | 5 |
| BAB 2 DASAR TEORI | |
| 2.1 Gangguan Sistem Tenaga Listrik | 7 |
| 2.2 Penyebab Gangguan Sistem Tenaga Listrik | 11 |
| 2.2.1 Gangguan Hubung Singkat | 11 |
| 2.2.2 Gangguan Beban Lebih | 12 |
| 2.2.3 Gangguan Tegangan Lebih | 12 |
| 2.3 Analisa Hubung Singkat | 12 |
| 2.4 Perhitungan Arus Hubung Singkat | 12 |
| 2.4.1 Hubung Singkat Tiga Fasa Ke Tanah | 13 |
| 2.4.1 Hubung Singkat Antar Fasa | 14 |
| 2.4.1 Hubung Singkat Fasa Ke Netral | 14 |
| 2.4.1 Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah | 14 |
| 2.5 Pengaman Sistem Tenaga Listrik | 14 |
| 2.6 Elemen Dasar Rele Pengaman | 15 |
| 2.7 Rele Arus Lebih | 16 |
| 2.7.1 Penyetelan Rele Arus Lebih | 16 |
| 2.7.2 Penyetelan Rele Arus Lebih Gangguan Fasa | 16 |
| 2.7.3 Karakteristik Rele Arus Lebih | 18 |

| | |
|---|----|
| 2.7.3.1 Waktu Tertentu (<i>Definite Time</i>) | 18 |
| 2.7.3.2 Invers Waktu (<i>Time Invers</i>)..... | 18 |
| 2.7.3.3 <i>Invers Definite Minimum Time</i> (IDMT) | 20 |
| 2.7.3.4 Rele Arus Lebih Waktu Instan | 21 |
| 2.8 Koordinasi Rele Arus dan Waktu | 23 |
| 2.9 SISFCL (<i>Saturated Iron Core Superconducting Fault Current Limiter</i>) | 24 |

BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PT. PUPUK KALIMANTAN TIMUR II (PKT II)

| | |
|---|----|
| 3.1 Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) | 25 |
| 3.2 Sistem Pembangkit | 25 |
| 3.3 Skema Operasi | 25 |
| 3.4 Sistem Distribusi..... | 26 |
| 3.5 Sistem Pentanahan | 27 |
| 3.5.1 Pentanahan Generator | 27 |
| 3.5.2 Pentanahan Transformator | 27 |

BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS KOORDINASI PROTEKSI PT. PUPUK KALIMANTAN TIMUR II (PKT II)

| | |
|--|----|
| 4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II)..... | 31 |
| 4.2 Analisa Kemampuan <i>Switchgear</i> | 32 |
| 4.3 Membatasi Arus Hubung Singkat dengan SISFCL (<i>Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter</i>) | 35 |
| 4.3.1 Peletakan SISFCL (<i>Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter</i>) | 36 |
| 4.3.2 Perhitungan Impedansi SISFCL (<i>Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter</i>) | 37 |
| 4.3.3 Analisa Pembatasan SISFCL (<i>Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter</i>) | 37 |
| 4.4 Koordinasi Proteksi | 41 |
| 4.5 Pemilihan Tipikal Koordinasi Setting Rele Pengaman pada PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II)..... | 41 |
| 4.6 Analisis Arus Hubung Singkat..... | 42 |
| 4.6.1Hubung Singkat Maksimum | 42 |
| 4.6.2Hubung Singkat Minimum | 43 |
| 4.7 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa..... | 43 |
| 4.7.1Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 1 | 44 |

| | |
|---|----|
| 4.7.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 2 | 50 |
| 4.7.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 3 | 56 |
| 4.7.4 Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 4 | 63 |

BAB 5 PENUTUP

| | |
|----------------------|----|
| 5.1 Kesimpulan | 71 |
| 5.2 Saran | 71 |

| | |
|-----------------------------|-----------|
| DAFTAR PUSTAKA | 73 |
|-----------------------------|-----------|

| | |
|-----------------------------|-----------|
| RIWAYAT PENULIS..... | 75 |
|-----------------------------|-----------|

| | |
|----------------------|-----------|
| LAMPIRAN..... | 76 |
|----------------------|-----------|

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|--------------------|---|----|
| Gambar 1.1 | <i>Flowchart</i> Tugas Akhir..... | 4 |
| Gambar 2.1 | Gelombang Arus Hubung Singkat | 13 |
| Gambar 2.2 | Skema Konsep Kerja Rele Pengaman..... | 15 |
| Gambar 2.3 | Bagian Elemen Dasar Rele Pengaman..... | 15 |
| Gambar 2.4 | Batas Ketelitian <i>Setting</i> Arus Berdasarkan BS 142-1983 | 17 |
| Gambar 2.5 | Karakteristik Rele Arus lebih Waktu Tertentu..... | 18 |
| Gambar 2.6 | Karakteristik <i>Standart Inverse</i> , <i>Very Inverse</i> dan <i>Extremely Invers</i> | 19 |
| Gambar 2.7 | Karakteristik Waktu IDMT Rele | 21 |
| Gambar 2.8 | Karakteristik Rele Arus lebih Waktu Instan | 22 |
| Gambar 2.9 | Kombinasi IDMT dengan Rele Arus Lebih Waktu Instan | 22 |
| Gambar 2.10 | Rele Arus Lebih Pengaman Trafo..... | 23 |
| Gambar 2.11 | Kondisi normal SISFCL | 24 |
| Gambar 2.12 | Skema Diagram SISFCL aktif | 25 |
| Gambar 4.1 | <i>Case 1</i> | 33 |
| Gambar 4.2 | <i>Case 2</i> | 33 |
| Gambar 4.3 | <i>Case 3</i> | 34 |
| Gambar 4.4 | Letak Pemasangan SISFCL pada <i>Case 1</i> | 36 |
| Gambar 4.5 | Grafik sebelum Pemasangan SISFCL..... | 38 |
| Gambar 4.6 | Grafik setelah Pemasangan SISFCL..... | 40 |
| Gambar 4.7 | Koordinasi Rele Tipikal 1..... | 45 |
| Gambar 4.8 | Kurva Koordinasi Arus Waktu eksisting Tipikal 1.. | 46 |
| Gambar 4.9 | Kurva Koordinasi Arus Waktu Resetting Tipikal 1. | 49 |
| Gambar 4.10 | Koordinasi Rele Tipikal 2..... | 51 |
| Gambar 4.11 | Kurva Koordinasi Arus Waktu eksisting Tipikal 2.. | 52 |
| Gambar 4.12 | Kurva Koordinasi Arus Waktu Resetting Tipikal 2. | 55 |
| Gambar 4.13 | Koordinasi Rele Tipikal 3..... | 57 |
| Gambar 4.14 | Kurva Koordinasi Arus Waktu eksisting Tipikal 3.. | 58 |
| Gambar 4.15 | Kurva Koordinasi Arus Waktu Resetting Tipikal 3. | 62 |
| Gambar 4.16 | Koordinasi Rele Tipikal 4..... | 64 |
| Gambar 4.17 | Kurva Koordinasi Arus Waktu eksisting Tipikal 4.. | 65 |
| Gambar 4.18 | Kurva Koordinasi Arus Waktu Resetting Tipikal 4. | 69 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|-------------------|--|----|
| Tabel 2.1 | Gambar rangkaian dan persamaan gangguan hubung singkat | 9 |
| Tabel 2.2 | Koefisien <i>invers time dial</i> | 20 |
| Tabel 3.1 | Data reaktansi generator..... | 27 |
| Tabel 3.2 | Data impedansi trafo | 28 |
| Tabel 3.3 | Data sistem pentanahan generator | 29 |
| Tabel 3.4 | Data pentanahan trafo..... | 29 |
| Tabel 4.1 | Data kontribusi <i>feeder</i> saat arus hubung singkat $\frac{1}{2}$ cycle pada swgr-1 kondisi eksisting | 31 |
| Tabel 4.2 | Kemampuan <i>switchgear</i> utama (swgr-1)..... | 34 |
| Tabel 4.3 | Arus hubung singkat dan kemampuan busbar <i>switchgear</i> (<i>case</i> 1) sebelum pemasangan SISFCL | 34 |
| Tabel 4.4 | Arus hubung singkat dan kemampuan busbar <i>switchgear</i> (<i>case</i> 2) sebelum pemasangan SISFCL | 35 |
| Tabel 4.5 | Arus hubung singkat dan kemampuan busbar <i>switchgear</i> (<i>case</i> 3) sebelum pemasangan SISFCL | 35 |
| Tabel 4.6 | Arus hubung singkat dan kemampuan busbar <i>switchgear</i> (<i>case</i> 1) setelah pemasangan SISFCL | 38 |
| Tabel 4.7 | Arus hubung singkat dan kemampuan busbar <i>switchgear</i> (<i>case</i> 2) setelah pemasangan SISFCL | 39 |
| Tabel 4.8 | Arus hubung singkat dan kemampuan busbar <i>switchgear</i> (<i>case</i> 3) setelah pemasangan SISFCL | 39 |
| Tabel 4.9 | Perbandingan nilai hubung singkat sebelum dan sesudah pemasangan SISFCL | 42 |
| Tabel 4.10 | Data hubung singkat maksimum 4 cycle | 43 |
| Tabel 4.11 | Data hubung singkat minimum 30 cycle | 43 |
| Tabel 4.12 | Data kondisi eksisting tipikal 1 | 44 |
| Tabel 4.13 | Data kondisi resetting tipikal 1 | 50 |
| Tabel 4.14 | Data kondisi eksisting tipikal 2 | 50 |
| Tabel 4.15 | Data kondisi resetting tipikal 2 | 56 |
| Tabel 4.16 | Data kondisi eksisting tipikal 3 | 56 |
| Tabel 4.17 | Data kondisi resetting tipikal 3 | 63 |
| Tabel 4.18 | Data kondisi eksisting tipikal 4 | 63 |
| Tabel 4.19 | Data kondisi resetting tipikal 4 | 70 |



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

PT. Pupuk Kalimantan Timur (PKT II) adalah perusahaan yang bergerak di bidang industri pupuk terutama pupuk urea dan amoniak. Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur (PKT II) telah diintegrasikan sejak tahun 2009 untuk meningkatkan kontinuitas dan keandalan sistem bagi seluruh plant. Sehingga terdapat penambahan beban dan pembangkit baru. Penambahan beban dan pembangkit baru akan memberikan arus hubung singkat pada kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur.

Gangguan hubung singkat yang terjadi pada sistem tenaga listrik mengakibatkan terjadinya aliran arus yang sangat besar menuju titik gangguan. Hal ini dapat mengakibatkan terganggunya kontinuitas pelayanan tenaga listrik. Serta dapat merusak peralatan listrik yang ada pada sekitar titik gangguan tersebut.. Pada saat terjadi gangguan hubung singkat maka akan mengalir arus yang sangat besar pada titik gangguan, dimana arus hubung singkat tersebut mempunyai harga yang jauh lebih besar dari rating kapasitas peralatan listrik.

Oleh karena itu dalam membatasi arus lebih akibat hubung singkat tersebut dapat digunakan pemasangan *Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter* (SISFCL). Pemasangan *Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter* (SISFCL) pada jaringan distribusi pada sistem tenaga listrik digunakan membatasi arus hubung singkat pada level yang tinggi. Sehingga, diharapkan pemasangan (SISFCL) dapat membatasi arus hubung singkat pada titik gangguan dan dapat menghemat biaya tanpa mengganti peralatan listrik yang rusak akibat arus hubung singkat yang besar.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Bagaimana prinsip kerja *Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter* (SISFCL) ?

2. Bagaimana pemasangan *Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter* (SISFCL) yang tepat dalam membatasi arus hubung singkat pada level arus yang tinggi ?
3. Bagaimana setting *Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter* (SISFCL) yang tepat untuk membatasi arus hubung singkat pada level arus yang tinggi ?
4. Bagaimana koordinasi proteksi setelah pemasangan *Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter* (SISFCL) ?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan masalah dalam tugas akhir ini, maka perlu diberi batasan-batasan sebagai berikut :

1. Simulasi dan analisa menggunakan *software* ETAP 11.0
2. Pemasangan *Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter* (SISFCL) pada busbar yang paling kritis untuk membatasi arus hubung singkat pada level arus yang tinggi.
3. Analisa hubung singkat yang dilakukan adalah 3 phasa fault $\frac{1}{2}$ cycle dan 4 cycle , line to line fault 30 cycle.
4. Koordinasi proteksi yang digunakan adalah koordinasi proteksi arus lebih gangguan fasa.

1.4 Tujuan dan Manfaat

Pada tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut :

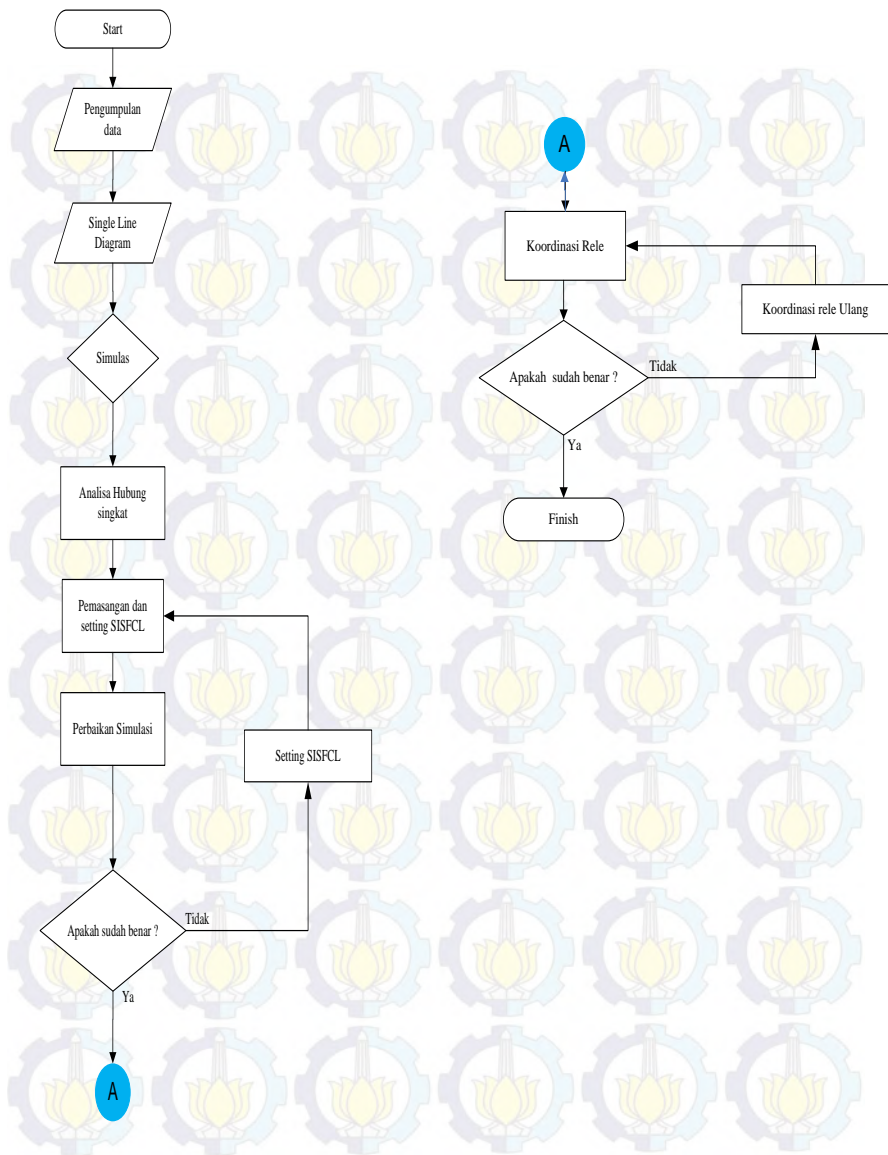
1. Mengetahui prinsip kerja *Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter* (SISFCL)
2. Mengetahui letak pemasangan *Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter* (SISFCL) yang tepat pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II)
3. Mengetahui setting *Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter* (SISFCL) yang tepat untuk membatasi arus hubung singkat pada level arus yang tinggi.
4. Mengetahui cara mengatur koordinasi proteksi akibat pemasangan *Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter* (SISFCL).

1.5 Metodologi

Metode penelitian yang digunakan pada tugas akhir ini sebagai berikut :

1. Studi tentang data dan informasi spesifikasi peralatan dari PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) yang nantinya dapat dipergunakan dalam membuat single line diagram dan disimulasikan di ETAP .
2. Analisa kemampuan busbar dalam menahan arus gangguan hubung singkat. Perhitungan arus hubung singkat terhadap busbar tidak hanya memperhatikan arus dari generator pada busbar tersebut namun juga memperhitungkan arus kontribusi dari beberapa cabang.
3. Pemasangan *Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter* (SISFCL), Setelah mengetahui besar arus hubung singkat di .
4. Setting *Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter* (SISFCL) di sesuaikan dengan arus hubung singkat.
5. Setelah pemasangan *Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter* (SISFCL) maka akan berkurangnya arus hubung singkat dan menyebabkan perubahan pengaturan koordinasi proteksi arus lebih.
6. Studi koordinasi proteksi arus lebih dilakukan menggunakan software ETAP
7. Setelah melakukan koordinasi proteksi arus lebih dan disimulasikan maka dapat diketahui bahwa peralatan disekitar titik gangguan sudah aman sehingga dapat meminimalisir pengeluaran biaya untuk mengganti peralatan listrik yang rusak akibat hubung singkat.

Berikut adalah diagram alir dari metodologi yang digunakan:



Gambar 1.1 *Flowchart* Tugas Akhir

1.6 Sistematika penulisan

Untuk memudahkan pembahasan yang akan dilakukan, tugas akhir ini terbagi menjadi lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi pengerjaan tugas akhir, sistematika pembahasan dan relevansi dari penulis.

BAB II : SISFCL DAN KOORDINASI PROTEKSI SISTEM TENAGA LISTRIK

Pada bab ini menjelaskan teori-teori penunjang yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

BAB III : SISTEM KELISTRIKAN PT.PUPUK KALIMANTAN TIMUR II (PKT II)

Dalam bab ini dijelaskan metode pelaksanaan studi serta penerapannya dalam studi kasus pada sistem tenaga listrik PT. PT.PUPUK KALIMANTAN TIMUR II (PKT II) sebelum dan sesudah pemasangan SISFCL, bagaimana konfigurasinya dan beberapa hal mengenai operasi sistem tenaga listrik PT.PUPUK KALIMANTAN TIMUR II (PKT II).

BAB IV : HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Dalam bab ini dibahas mengenai hasil simulasi yang telah dilakukan. Dalam bab ini akan disajikan analisis terhadap kinerja dan koordinasi rele arus lebih ketika terjadi gangguan hubung singkat terjadi ,serta beberapa rekomendasi untuk memperbaiki setelan yang sudah ada ketika sebelum dan sesudah pemasangan SISFCL sehingga menghasilkan koordinasi rele pengaman yang lebih baik.

BAB V : PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil simulasi, studi literatur dan analisis yang telah dilakukan.



BAB 2

DASAR TEORI

Dalam setiap sistem tenaga listrik selalu menggunakan sistem proteksi atau pengaman untuk mengantisipasi apabila terjadi gangguan. Sehingga dapat menjaga keandalan dan kontinuitas pada suatu sistem kelistrikan. Sistem proteksi atau pengaman berfungsi untuk memisahkan bagian yang mengalami gangguan dengan yang tidak mengalami gangguan, sehingga sistem tetap dapat beroperasi meskipun sedang terjadi gangguan.

Sistem proteksi dapat berjalan dengan baik salah satunya diperlukan koordinasi rele pengaman. Koordinasi rele pengaman merupakan pengaturan setting arus dan waktu dari beberapa rele pengaman agar diperoleh selektivitas yang tinggi dalam melokalisasi gangguan yang terjadi agar tidak terjadi trip di sisi hulu dan hilir pada saat yang bersamaan. Rele yang terdekat dengan lokasi gangguan harus bekerja secepat mungkin untuk memutus gangguan. Jika rele ini gagal mengamankan gangguan, maka rele di atasnya akan menjadi backup untuk segera mengamankan gangguan sesuai koordinasi rele pengaman yang telah ditentukan.

2.1 Gangguan Sistem Tenaga Listrik

Gangguan dapat merusak sistem tenaga listrik dalam berbagai cara :

1. Gangguan yang mengalirkan arus yang sangat besar, dapat menghasilkan panas yang berlebih pada peralatan sistem tenaga listrik.
2. Gangguan biasanya berupa hubung singkat dan berupa busur api di udara dengan temperature yang sangat tinggi, sehingga dapat melelehkan peralatan sistem tenaga listrik yang ada didekatnya.
3. Gangguan dapat menurunkan dan menaikkan tegangan sistem diluar kapasitas tegangan sistem tersebut.
4. Gangguan dapat menyebabkan sistem tiga fasa menjadi tidak seimbang dan menyebabkan peralatan tiga fasa bekerja secara tidak normal.
5. Gangguan dapat memblokir aliran daya
6. Gangguan dapat menyebabkan sistem tidak stabil dan terputusnya saluran.

Pada dasarnya gangguan pada sistem tenaga listrik merupakan suatu keadaan tidak normal yang mengakibatkan terganggunya kontinuitas pelayanan tenaga listrik. Adapun faktor penyebab gangguan ada 2, yaitu :

1. Gangguan berasal dari dalam sistem
2. Gangguan berasal dari luar sistem

Penyebab Gangguan yang berasal dari dalam sistem antara lain disebabkan oleh kesalahan mekanis (dapat terjadi karena proses penuaan atau karena kerusakan material seperti kawat putus, isolator pecah, retaknya bearing, dll), Pemasangan yang kurang baik (dapat menyebabkan arus hubung singkat), Tegangan dan arus tidak normal pada sistem, Beban lebih (melebihi kapasitas sistem), Sedangkan gangguan yang berasal dari luar sistem antara lain pengaruh cuaca (hujan, angin, serta surja petir), pengaruh lingkungan (pohon tumbang, benda asing jatuh, dan juga akibat kecerobohan manusia). Pada gangguan surja petir dapat menyebabkan gangguan hubung singkat karena tembus pada isolasi peralatan (*breakdown*). Gangguan di tinjau dari lamanya waktu, yaitu[2] :

1. Gangguan sementara (*temporary*)
2. Gangguan permanen (*Stationary*)

Untuk gangguan sementara yaitu gangguan yang dapat hilang sendirinya (seketika) atau diputusnya secara sesaat dari sumber tegangan. Gangguan sementara dapat beroperasi jika circuit breaker di masukkan/di operasikan kembali ke keadaan normal. Sedangkan gangguan permanen yaitu gangguan yang diperlukan tindakan perbaikan peralatan agar dapat menghilangkan penyebab gangguan tersebut. Gangguan permanen ini dapat beroperasi jika bagian yang rusak diperbaiki atau diganti. Kecuali gangguan permanen yang disebabkan oleh sesuatu yang mengganggu secara permanene, misalnya kawat phasa dari saluran udara yang tertimpa dahan.

Sehingga di sistem tenaga listrik, gangguan yang terjadi dapat di klasifikasikan sebagai berikut :

1. Gangguan Listrik :

Yaitu jenis gangguan yang timbul dan terjadi pada bagian-bagian listrik. Gangguan-gangguan tersebut antara lain :

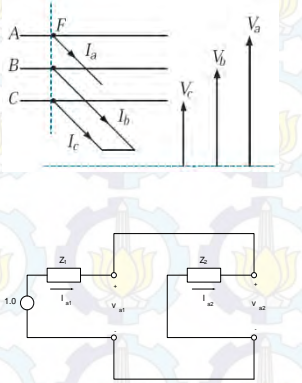
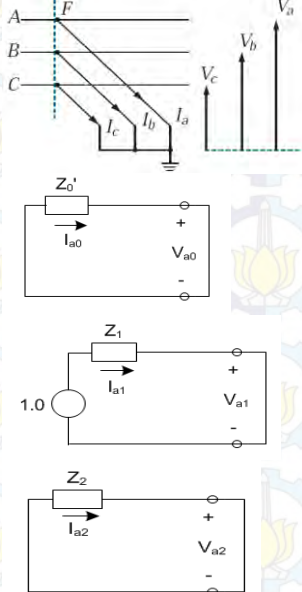
- Gangguan hubung singkat 3 (tiga) Phasa simetri (lansung)

- Gangguan hubung singkat 2 (dua) Fasa ke tanah
- Gangguan hubung singkat 1 (satu) Fasa ke tanah
- Gangguan hubung singkat antar fasa
- Gangguan beban lebih (*overload*)
- Gangguan tegangan lebih

Tabel 2.1 Gambar rangkaian dan persamaan gangguan hubung singkat

| Gangguan Hubung Singkat | Rangkaian Hubung Singkat & Rangkaian Pengganti | Persamaan |
|-------------------------|--|--|
| 1 fasa ke tanah | | $I_b = 0$ $I_c = 0$ $V_a = 0$ $I_{sc} = \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$ |
| 2 fasa ke tanah | | $I_a = 0$ $V_b = 0$ $V_c = 0$ $I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)}$ |

Tabel 2.1 Gambar rangkaian dan persamaan gangguan hubung singkat (Lanjutan)

| Gangguan Hubung Singkat | Rangkaian Hubung Singkat & Rangkaian Pengganti | Persamaan |
|--------------------------------|--|---|
| Antar fasa |  | $I_a = 0$ $I_b = -I_c$ $V_b = V_c$ $I_{sc} = \left \pm j \frac{\sqrt{3}V_f}{Z_1 + Z_2} \right $ |
| 3 fasa langsung (simetri) |  | $V_{a0} = 0$ $V_{a2} = 0$ $I_{a0} = 0$ $I_{a2} = 0$ $I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1}$ $I_{sc} = \frac{V_f}{Z_1}$ |

2. Gangguan mekanis

Jenis gangguan yang berhubungan dengan ketahanan dan kekuatan fisik dari peralatan sistem tenaga listrik. Gangguan ini terjadi karena adanya kerusakan secara fisik dari peralatan sistem tenaga listrik.

3. Gangguan Sistem

Jenis gangguan yang disebabkan keadaan sistem, dengan parameternya yang digunakan yaitu tegangan, frekuensi dan daya.

4. Gangguan akibat operasi sistem

Jenis gangguan ini terjadi karena perbedaan operasi sistem dengan petunjuk sistem yang digunakan. Gangguan ini menitik beratkan pada suatu peralatan yang parameternya tidak sesuai dengan sistem.

2.2 Penyebab Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik

2.2.1 Gangguan Hubung singkat

Gangguan hubung singkat dapat terjadi di kondisi 2 fasa, tiga fasa, satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, 3 fasa, 3 fasa ke tanah. Atau Antar fasa Gangguan hubung singkat ini dapat dikelompokkan menjadi 2, yaitu[1] :

1. Gangguan hubung singkat simetri
2. Gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri)

Yang termasuk gangguan hubung singkat simetri yaitu gangguan hubung singkat 3 fasa, sedangkan gangguan yang lainnya merupakan gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri). Gangguan ini akan mengakibatkan arus yang berlebih pada saluran fasa yang terkena hubung singkat dan mengakibatkan kenaikan tegangan pada saluran fasa yang tidak terganggu. Umumnya gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik yaitu gangguan tak simetri.

Gangguan tak simetri akan menyebabkan mengalirnya arus tak seimbang dalam sistem tenaga listrik sehingga untuk menganalisa gangguan tersebut diperlukan metode komponen simetri untuk menentukan arus maupun tegangan disemua bagian sistem yang terjadi gangguan.

2.2.2 Gangguan Beban Lebih

Jenis gangguan ini terjadi karena keadaan dimana peralatan bekerja melebihi kondisi kerja maksimal sehingga tidak mampu menahan arus beban penuh yang mengalir ke sistem.

2.2.3 Gangguan Tegangan Lebih

Gangguan tegangan lebih terjadi apabila ada kelainan dalam sistem. Gangguan tegangan lebih dapat terjadi antara lain karena :

1. Gangguan petir
2. Gangguan surja hubung, diantaranya adalah penutupan saluran yang tidak serempak pada saat pemutusan tiga fasa, penutupan saluran kembali dengan cepat, pelepasan beban akibat gangguan, penutupan saluran yang semula tidak masuk ke dalam sistem dan sebagainya.

2.3 Analisis Hubung Singkat

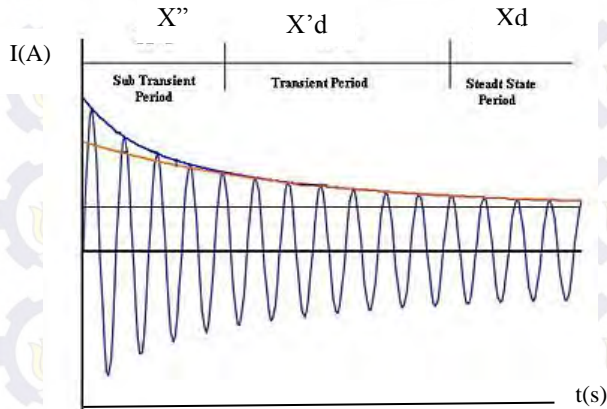
Asumsi dalam analisis hubung singkat :

1. Beban normal, Kapasitansi charging dan beban statis tegangan diabaikan
2. Semua perhitungan awalnya dianggap ideal (semua tegangan dianggap 1 pu).
3. *Transformers tap* dapat ditetapkan pada posisi baik nominal maupun posisi tapnya dan skema berbeda yang tersedia untuk sistem impedansi transformator yang benar dan jika off-nominal tersedia.
4. Suatu gangguan terjadi terbatas pada bus yang diberi gangguan dan resistansi *short circuit* diabaikan.
5. Sistem diasumsikan seimbang dan metode komponen simetris digunakan untuk gangguan yang tidak seimbang.

2.4 Perhitungan Arus Hubung Singkat

Pada saat terjadi hubung singkat, akan mengalir arus yang cukup besar ke titik gangguan. Nilai dari reaktansi sumber dan reaktansi rangkaian yang dilalui arus hubung singkat akan mempengaruhi besarnya arus tersebut. Reaktansi awal sangat kecil dan arus yang sangat besar di sebut reaktansi subtransient atau *subtransient reactance* (X''_d) dengan waktu 0-1/2 *cycle*. Kemudian cenderung menurun, dengan waktu 1/2-4 *cycle* disebut dengan reaktansi transien atau *transient reactance* (X'_d). kemudian kondisinya mencapai dan pada saat ini

reaktansinya disebut dengan reaktansi sinkron atau *synchronous reactance* (X_d). Pada kondisi *steady state* yang masih memberikan arus kontribusi hanya sumber (*utility*, generator) dan motor sinkron. Reaktansi pada rangkaian yang dialiri arus hubung singkat dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Gelombang arus hubung singkat

Adanya gangguan hubung singkat pada sistem tenaga listrik akan mengakibatkan terhentinya kontinuitas daya akibat terbuka *circuit breaker* sehingga akan berkurangnya stabilitas daya, dan jika arus hubung singkat melebihi kapasitas kemampuan peralatan sistem tenaga listrik, maka peralatan akan rusak sistem tenaga listrik[4].

Perhitungan praktis untuk menghitung besar arus hubung singkat dalam suatu sistem distribusi dapat dilakukan sebagai berikut:

2.4.1 Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

Hubung singkat ini melibatkan ketiga fasa. Arus hubung singkat tiga fasa ($I_{hs_{3\phi}}$) diberikan oleh persamaan berikut :

$$I_{hs_{3\phi}} = \frac{V_{LN}}{X_1} \quad (2.1)$$

Di mana V_{LN} adalah tegangan nominal *line to netral*, dan X_1 adalah reaktansi urutan positif.

2.4.2 Hubung Singkat Antar Fasa

Hubung singkat ini terjadi antara dua fasa tanpa terhubung ke tanah. Arus hubung singkat antar fasa ($I_{hs_{2\phi}}$) diberikan oleh persamaan berikut :

$$I_{hs_{2\phi}} = \frac{V_{LL}}{X_1 + X_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{hs_{3\phi}} \approx 0.86 I_{hs_{3\phi}} \quad (2.2)$$

2.4.3 Hubung Singkat Fasa ke Netral

Hubung singkat ini terjadi antara salah satu fasa dengan netral. Arus hubung singkat fasa ke netral ($I_{hs_{1\phi}}$) diberikan oleh persamaan berikut :

$$I_{hs_{1\phi}} = \frac{V_{LL}/\sqrt{3}}{Z_{sc} + Z_{LN}} \quad (2.3)$$

Dengan Z_{LN} adalah impedansi netral.

2.4.4 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Hubung singkat ini melibatkan impedansi urutan nol (Z_0), dan besarnya arus hubung singkat ini tergantung sistem pentanahan yang digunakan. Arus hubung singkat antar fasa ($I_{hs_{1\phi} \perp}$) diberikan oleh persamaan berikut :

$$I_{hs_{1\phi} \perp} = \frac{3V_{LN}}{X_1 + X_2 + X_0} \quad (2.4)$$

2.5 Pengaman Sistem Tenaga Listrik

Untuk mengatasi akibat dari gangguan sistem tenaga listrik, maka diperlukan rele pengaman. Rele merupakan bagian dari peralatan sistem tenaga listrik yang memberikan sinyal kepada pemutus (*Circuit breaker*) untuk memutuskan atau menghubungkan kembali ke pelayanan penyaluran elemen sistem tenaga listrik jika terjadi gangguan.

Pada dasarnya rele pengaman terdiri dari sebuah elemen operasi dari seperangkat kontak. Elemen operasi menerima masukan dari transformator arus (CT) ataupun tegangan dari transformator tegangan (PT) atau kombinasi dari keduanya.

Dalam beberapa kasus, rele melakukan pengukuran atau perbandingan operasi dasar input dan mengubahnya dalam bentuk gerakan kontak. Keadaan keluaran dari rele adalah menutup (*close*) dan ditahan (*block*). Jika keadaan tertutup maka rele akan memberikan sinyal untuk melakukan proses pembukaan dari *circuit breaker* dimana pada gilirannya akan mengisolasi gangguan dari bagian sistem tenaga

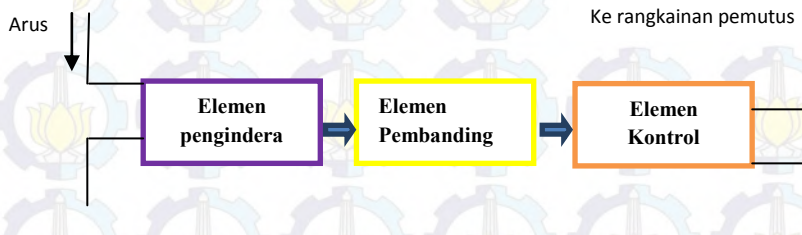
yang lain. Didalam penyetelan sebuah rele harus dilakukan dengan benar agar tidak terjadi kesalahan operasi saat terjadi gangguan. Oleh karena itu, hal-hal yang mempengaruhi penyetelan rele harus benar-benar diperhatikan.



Gambar 2.2 Skema konsep kerja rele pengaman

2.6 Elemen Dasar Rele Pengaman

Rele pengaman biasanya terdiri dari tiga elemen dasar yang saling berkaitan satu sama yang lain dan memiliki perannya sesuai dengan fungsi kerjanya



Gambar 2.3 Bagian elemen dasar rele pengaman

a. Elemen Pengindra

Elemen ini berfungsi untuk merasakan besaran- besaran listrik seperti arus, tegangan, frekuensi dan sebagainya tergantung rele yang digunakan. Pada elemen ini besaran yang masuk akan dirasakan keadaannya apakah keadaan yang di proteksi mendapatkan gangguan atau dalam keadaan normal yang untuk selanjutnya besaran tersebut dikirimkan ke elemen pembanding. Komponen yang berfungsi sebagai elemen pengindra adalah transformator arus (CT).

b. Elemen Pembanding

Elemen ini berfungsi untuk menerima besaran setelah terlebih dahulu besaran itu diterima oleh elemen pengindra untuk membandingkan besaran listrik pada saat keadaan normal dengan besaran yang disetting pada rele. Komponen yang berfungsi sebagai elemen pembanding ini adalah rele,

yang bekerja setelah mendapatkan besaran dari elemen pengindera dan membandingkan dengan besaran arus penyetelan dan kerja rele.

c. Elemen Kontrol

Elemen ini berfungsi untuk mengadakan perubahan secara cepat pada besaran ukurnya dan akan segera memberikan isyarat untuk membuka pemutus (circuit breaker) atau memberikan sinyal. Komponen yang berfungsi sebagai elemen control adalah kumparan penjatuh (trip-coil)

2.7 Rele Arus Lebih

Rele arus lebih merupakan salah satu jenis rele yang bekerja berdasarkan besarnya arus masukan dan apabila besarnya arus masukan melebihi suatu harga tertentu yang dapat diatur (I_p) maka rele arus lebih tersebut akan bekerja. Dimana I_p merupakan arus kerja yang dinyatakan menurut belitan sekunder *current transformator* (CT). Bila suatu gangguan terjadi didalam daerah perlindungan rele, besarnya arus gangguan I_f yang juga dinyatakan terhadap belitan sekunder CT. Rele arus lebih bekerja apabila memenuhi keadaan sebagai berikut[3]:

| | | |
|-------------|------------------|--------|
| $I_f > I_p$ | rele bekerja | (trip) |
| $I_f < I_p$ | rele tidak kerja | (blok) |

2.7.1 Penyetelan Rele Arus Lebih

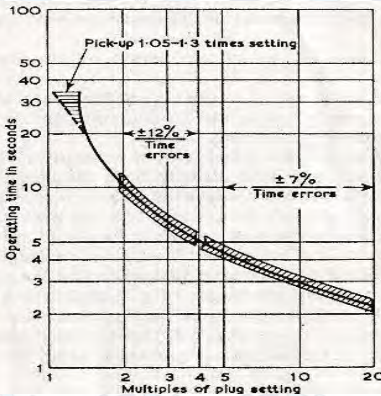
Pada dasarnya rele arus lebih memiliki fungsi sebagai pengamanan gangguan hubung singkat, tetapi dalam beberapa hal dapat berfungsi sebagai pengamanan beban lebih. Fungsi dari rele arus lebih selain sebagai pengamanan utama untuk bagian yang diamankan juga berfungsi sebagai pengamanan cadangan (*back up*) pada bagian berikutnya. Hal ini apabila arus lebih diapakai pada sistem dsitribusi tegangan menengah. Namun pada saluran transmisi tegangan tinggi rele arus lebih berfungsi sebagai *back up*, dimana rele jarak sebagai pengamanan utama.

Gangguan yang terjadi pada saluran transmisi adalah gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, maka penyetelannya juga berbeda sehingga akan diuraikan kriteria penyetelannya untuk gangguan fasa dan gangguan tanah secara terpisah.

2.7.2 Penyetelan Rele Arus Lebih Gangguan Fasa

Penyetelan arus untuk arus lebih memiliki batasan besarnya arus. Batas penyetelan rele ars lebih adalah rele tidak boleh bekerja pada saat

beban maksimum. Arus *setting* yang ditentukan harus lebih besar dari arus beban maksimum.



Gambar 2.4 Batas ketelitian *setting* arus berdasarkan BS 142-1983

Berdasarkan pada gambar 2.4 batas penyetelan harus memperhatikan kesalahan pick up, menurut Standart British BS 142-1983 batas penyetelan antara nominal 1,05 – 1,3 I_{set} . Mengacu pada standart tersebut, pada tugas akhir ini menggunakan konstanta 1,05 Iset. Jadi untuk setingnya dapat dilihat sebagai berikut:

$$I_{set} \geq 1,05 \times I_{nominal} \quad (2.5)$$

$$I_s = \frac{I_{set}}{CT\ ratio} \quad (2.6)$$

dimana :

I_s = arus *setting*

Pemilihan tap yang digunakan = I_s / I_n . Seting arus *actual* $I_{set} = \text{tap} \times I_n \times CT$. Dicari nilai dibawahnya yang terdekat.

Pada penyetelan rele arus lebih juga harus memperhatikan batas maksimum seting , untuk alasan keamanan dan back up hingga ke sisi muara (*downstream*) estimasi seting ditetapkan :

$$I_{set} \leq 0,8 I_{sc2,min} \quad (2.7)$$

$I_{sc2,min}$ adalah arus hubung singkat dua fasa dengan pembangkitan minimum yang terjadi diujung saluran seksi berikutnya. Besar arus ini diperoleh dari arus hubung singkat tiga fasa pada pembangkitan

minimum dikalikan 0,866. Mengacu pada konsep diatas persyaratan setelan arus dapat dirumuskan sebagai berikut :

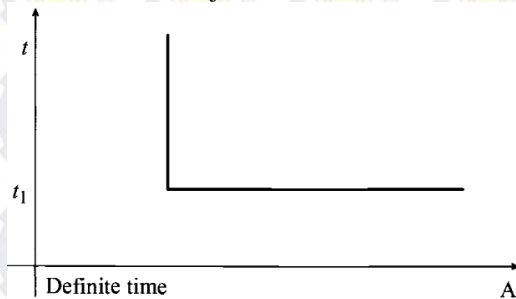
$$1,05 I_{maks} < I_{set} \leq 0,8 I_{sc2,min} \quad (2.8)$$

Penggunaan pada operasi yang selektif, apabila terdapat beberapa rele arus lebih pada suatu jaringan radial. Maka rele pada ujung yang terjauh dari sumber penyetelannya harus dapat bekerja pada waktu yang sesingkat mungkin. Pada jenis rele arus lebih, yang memiliki karakteristik *inverse*, setelan waktu ditentukan pada saat arus gangguan maksimum.

2.7.3 Karakteristik Rele Arus Lebih

2.7.3.1 Waktu Tertentu (*Definite Time*)

Pada penggunaan rele arus lebih waktu tertentu memungkinkan pengaturan waktu operasi yang bervariasi berdasarkan level arus yang berbeda[4]. Sistem rele ini dapat disesuaikan sedemikian rupa sehingga PMT yang paling dekat dengan sumber gangguan akan bekerja (*trip*) lebih cepat daripada yang lain, dan pengaman sisanya akan trip lebih cepat daripada yang lain, dan pengaman sisanya akan *trip* setelah waktu tunda (*time delay*) yang diberikan gangguan masih terus berlanjut. Pada rele arus lebih waktu tertentu, semua level arus yang melebihi *pick-up setpoint*-nya akan diputuskan dalam waktu yang sama (*definite*)[7]. Gambar 2.5 menunjukkan karakteristik rele arus lebih waktu tertentu.



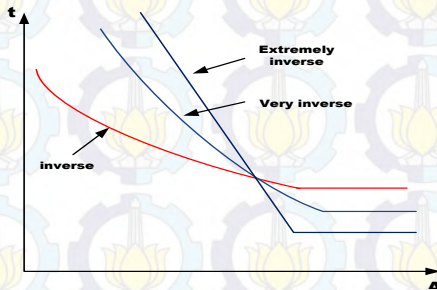
Gambar 2.5 Karakteristik rele arus lebih waktu tertentu (*definite time*).

2.7.3.2 *Inverse Waktu (Time Inverse)*

Waktu operasi yang dimiliki rele arus lebih waktu *inverse* berbanding terbalik dengan besarnya arus gangguan [4]. Jadi semakin besar arus gangguan maka rele akan beroperasi dalam waktu yang

semakin cepat dan sebaliknya jika arus gangguan yang muncul kecil maka rele akan beroperasi pada waktu yang lama. Karakteristik kerja rele arus lebih waktu inverse digambarkan dalam kurva arus-waktu atau disebut juga *time current curve* (TCC). TCC adalah kurva dengan skala dalam *time dial*. Semakin besar *time dial*, semakin lama waktu operasi dari rele tersebut[8].

Karakteristik *inverse* ini dijelaskan dalam standar IEC 60255-3 dan BS 142. Standar-standar ini mendefinisikan beberapa jenis perlindungan waktu *inverse* yang dibedakan oleh gradien kurvanya, yaitu *standart inverse*, *very inverse* dan *extremely inverse*[7]. Pada IEEE juga diberikan standar lain untuk rele arus lebih waktu invers, yaitu *moderately inverse*, *long time inverse*, dan *short time inverse*[5].



Gambar 2.6 Karakteristik *Standart Inverse*, *Very Inverse* dan *Extremely Invers*

Rele arus lebih memiliki setelan *pick up* dan *time dial*. *Pick up* adalah nilai arus minimum agar rele bekerja. Untuk menentukan setelan *pick up* perlu dipertimbangkan besarnya arus nominal yang mengalir. Setelan *pick up* harus lebih besar dari arus nominal yang mengalir, agar rele tidak trip ketika arus yang mengalir mencapai nilai maksimum. Pada rele arus lebih, nilai arus *pick up* ditentukan dengan pemilihan tap. Untuk menentukan besarnya nilai *tap*, maka digunakan persamaan berikut [10]:

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT_{primary}} \quad (2.9)$$

Iset adalah besarnya arus pick up dalam ampere. Dalam aplikasi praktis dilapangan. Digunakan setelan 115%-150% dari arus nominal. Namun pemilihan *Iset* tergantung pada keperluannya, pada motor pick arus lebih diambil 115% dari arus beban penuh[4][7], feeder dan trafo diambil *iset* 120% dari arus beban penuhnya [7].

Waktu operasi rele ditentukan oleh setelan *time dial*. Untuk menentukan *time dial* dari masing-masing kurva karakteristik invers rele arus lebih dapat digunakan persamaan sebagai berikut [8][9][10]:

$$td \geq \frac{K \times t}{\left[\left(\frac{I}{I_{set}}\right)^{\alpha} - 1\right]^{\frac{1}{\beta}}} \quad (2.10)$$

Di mana :

t = waktu operasi (detik)

Td = *time dial*

I = nilai arus (Ampere)

Iset = arus *pickup* (Ampere)

k = koefisien invers 1 (lihat Tabel 2.2)

α = koefisien invers 2 (lihat Tabel 2.2)

β = koefisien invers 3 (lihat Tabel 2.2)

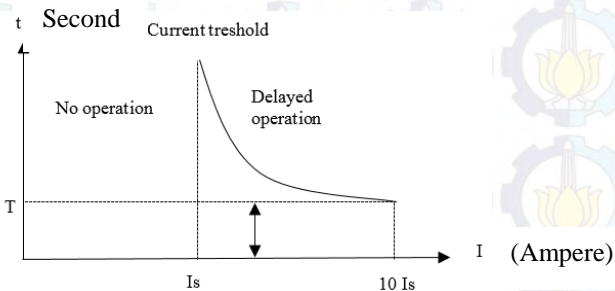
Tabel 2.2 Koefisien invers *time dial*

| Tipe Kurva | Koefisien | | |
|--------------------------|-----------|----------|---------|
| | <i>k</i> | α | β |
| <i>Standard Inverse</i> | 0,14 | 0,02 | 2,970 |
| <i>Very Inverse</i> | 13,50 | 1,00 | 1,500 |
| <i>Extremely Inverse</i> | 80,00 | 2,00 | 0,808 |

2.7.3.3 Inverse Definite Minimum Time (IDMT)

Karakteristik rele ini mempunyai kombinasi antara *inverse* dan *definite time*. Rele bekerja *inverse* jika arus gangguan minimum melebihi *setting* arus setting rele, sedangkan apabila arus gangguan maksimum rele bekerja pada daerah *definite* maka akan tergantung pada setelan waktunya.

Rele harus mampu bekerja pada kondisi pembangkitan minimum untuk gangguan 2 phasa untuk karakteristik IDMT. Arus setting harus lebih besar dari arus beban penuh. Penyetelannya pun harus memperhatikan kesalahan pick up sesuai dengan british standart pick up $=1.05 \text{ s/d } 1.3 \text{ Iset}$. Pada gambar 2.7 dapat kita perhatikan kurvanya.

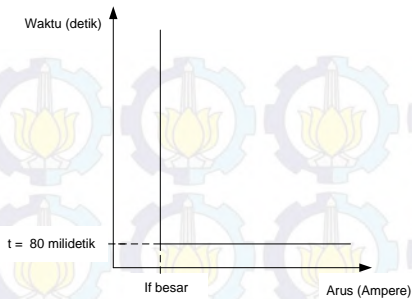


Gambar 2.7 Karakteristik waktu IDMT Rele

2.7.3.4 Rele Arus Lebih Waktu Instan

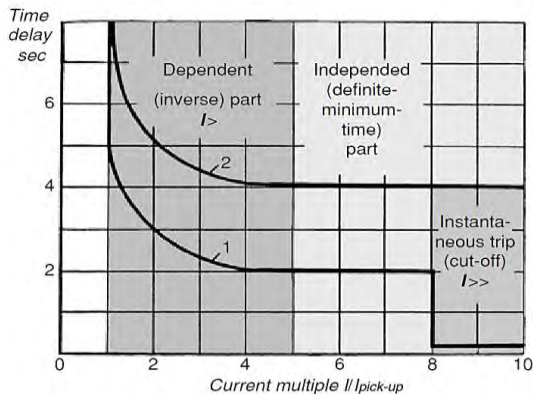
Dalam penerapannya, rele arus lebih waktu inverse dengan karakteristik IDMT kurang efektif dalam mengamankan gangguan. Karena semakin dekat gangguan yang terjadi dengan sumber, maka magnitudo arus yang mengalir akan semakin besar, tetapi waktu memutus terlalu lama. Sedangkan tingkat keamanan sistem proteksi dinilai dari kecepatan sistem proteksi memutus gangguan. Oleh sebab itu, perlu ditambahkan bantuan rele arus lebih instan sehingga menghasilkan sistem proteksi yang lebih baik [3].

Prinsip kerja jenis rele ini adalah tanpa penundaan waktu, tetapi masih bekerja dengan waktu cepat sebesar 0.1detik, pada umumnya kurang dari 0.08 detik[6], dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.8 Karakteristik rele arus lebih instan

Rele dengan karakteristik ini bekerja sesuai dengan besarnya arus gangguan yang dipilih. Dalam setting koordinasi proteksi pada sistem distribusi tegangan menengah disebut dengan setting moment/instant. Misalnya pada saat terjadi gangguan hubung singkat, CB terbuka dalam waktu cepat sekali (80 ms), yang berarti gangguan hubung singkat yang muncul gangguan dengan arus yang sangat besar.

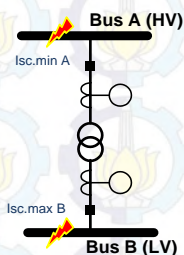


Gambar 2.9 Kombinasi IDMT dengan rele arus lebih waktu instan [4]

Rele arus lebih bekerja secara seketika apabila ada arus lebih yang mengalir melebihi batas yang diinginkan. Bekerjanya rele dengan karakteristik ini berdasarkan arus gangguan hubung singkat yang dipilih.

Untuk perhitungan setelan *pick up* rele instan, sama dengan perhitungan tap rele arus lebih waktu *inverse*.

Pertimbangan dalam menentukan nilai *pick up* instant adalah berdasarkan karakteristik peralatan yang dilindungi. Untuk pengaman *feeder* yang dipisahkan oleh trafo, koordinasi pengaman dibedakan menjadi dua daerah yaitu sisi tegangan rendah (LV) dan sisi tegangan tinggi (HV)[8].



Gambar 2.10 Rele arus lebih pengaman trafo

Syarat setelan *pick up* instan pada tipe koordinasi harus memenuhi syarat berikut [7]:

$$I_{sc \max \text{ bus } B} \leq I_{set} \leq 0,8 I_{sc \min \text{ bus } A} \quad (2.11)$$

Dimana $I_{sc \max \text{ bus } B}$ merupakan arus hubung singkat tiga fasa maksimum di titik B, sedangkan $0,8 I_{sc \min \text{ bus } A}$ merupakan arus hubung singkat minimum pada titik A.

2.8 Koordinasi Rele Arus dan Waktu

Susunan rele pengaman dalam suatu sistem kelistrikan terdiri dari rele pengaman utama dan rele pengaman cadangan (*back up*). Antara rele pengaman utama dan rele pengaman *back up* harus dikoordinasikan agar rele tidak bekerja secara bersamaan maka diperlukan waktu tunda (*time delay*). Waktu kerja minimal antara rele utama dan rele *backup* adalah 0.2 – 0.35 detik.

Waktu buka CB : 0,04 – 0,1s (2-5 cycle)

Overtravel dari rele : 0,1s

Faktor keamanan : 0,12-0,22s

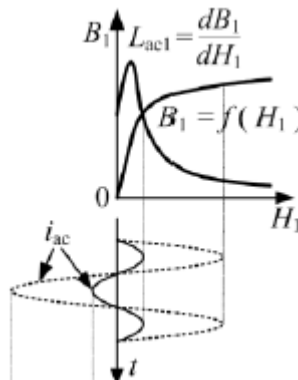
Untuk rele berbasis *microprocessor Overtravel time* dari rele diabaikan. Sehingga total waktu yang diperlukan adalah 0,2-0,4s[5].

2.9 SISFCL (*Saturated Iron-Core Superconducting fault current limiter*)

SISFCL (*Saturated iron-core superconducting fault current limiter*) merupakan salah satu solusi terbaik untuk membatasi gangguan arus hubung singkat pada level arus yang tinggi dengan memanfaatkan impedansi yang besar. SISFCL (*Saturated iron core superconducting fault current limiter*) juga digunakan dalam pengembangan riset teknologi untuk sistem tenaga listrik di masa depan. SISFCL (*Saturated iron core superconducting fault current limiter*) adalah salah satu jenis SFCL (*Superconducting fault current limiter*) yang berbahan induktif.

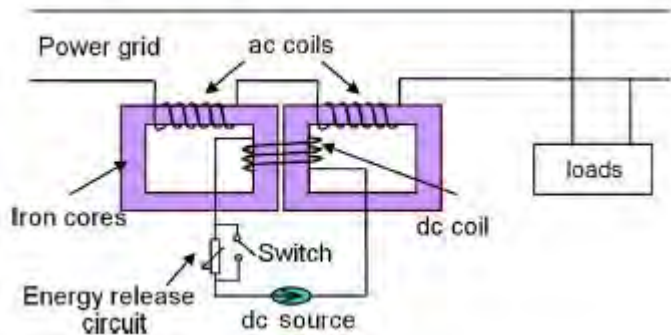
Prinsip kerja dari SISFCL (*Saturated iron core superconducting fault current limiter*) didasarkan pada prinsip rekator inti besi konvensional, pada kondisi normal saklar *normaly close*, sehingga sumber dc mengalir ke kumparan. Kondisi ini dinamakan kondisi saturasi dengan impedansi kecil berdasarkan rumus :

$$L = \frac{dB}{dH}$$



Gambar 2.11 kondisi normal SISFCL [14]

Gambar 2.11 menggambarkan jika H besar maka B tetap sehingga L akan kecil. Kemudian pada kondisi gangguan (*normally open*), arus AC yang besar akan menimbulkan arc flash namun akan diredam oleh energy release circuit[12]. Kondisi ini akan mendorong keluar dari keadaan saturasi (keadaan jenuh) menuju ke permeabilitas yang tinggi sehingga mengakibatkan peningkatan impedansi dan dapat membatasi arus hubung singkat yang tinggi [11]. SISFCL ini mendeteksi gangguan hubung singkat $\frac{1}{2}$ cycle pada waktu 1 ms, kemudian akan membatasi arus arus hubung singkat tersebut pada waktu 5 ms, setelah gangguan hilang maka switch akan kembali ke kondisi normal dengan rentang waktu 800 ms [13].



Gambar 2.12 Skema rangkaian magnetisasi dc SISFCL aktif [11]



BAB 3

SISTEM KELISTRIKAN PT. PUPUK KALIMANTAN TIMUR II (PKT II)

3.1 Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II)

Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) memakai sistem distribusi ring 11 KV. Terbagi menjadi 11 *feeder*. Dengan beban composit motor sebesar 13085,4 kW dan lump load sebesar 1250 kVA. Dengan sumber utama Generator 36,4 MW. Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) memiliki level beberapa level tegangan, yaitu tegangan terbangkit sebesar 11 kV dari generator 36.4 MW dan tersuplai ke beban menjadi 6,9 kV, 6,6 kV, 0,5 kV, 0,4kV, dan 0,525 kV. Adapun *Single Line Diagram* sistem kelistrikin PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) terlampir.

3.2 Sistem Pembangkit

Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) memiliki sumber energi listrik sebagai berikut:

- Sumber dari generator (GTG) sebesar 36,4 MW

Dapat dilihat pada tabel data reaktansi generator pada tabel 3.1 dibawah ini.

Tabel 3.1 Data reaktansi generator

| no | Generator | MW | Kv | pf | Reactance (%) | |
|----|-----------|------|----|----|---------------|------|
| | | | | | Xd'' | Xd' |
| 1 | GTG | 36,4 | 11 | 80 | 25 | 25,9 |

3.3 Skema Operasi

Pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) terdapat skema operasi normal yaitu terhubung dengan generator(GTG) 36,4 MW dan jika kondisi GTG 36,4 MW off, maka yang mensuplai beban PKT I, III, IV, dan V.

3.4 Sistem Distribusi

Sistem distribusi adalah kesatuan peralatan yang bekerja menyalurkan tenaga listrik dari sumber ke beban. Sistem distribusi yang digunakan pada PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) adalah sistem distribusi radial. Sistem distribusi menggunakan tegangan menengah 11 kV. Tegangan menengah ini akan diturunkan dengan trafo *step down* menjadi tegangan rendah 6,9 kV, 6,6 kV, 0,5 kV, 0,4 kV, dan 0,525 kV. Data impedansi trafo dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Data impedansi trafo

| No | Trafo ID | Lokasi | MVA | kV | Impedansi | |
|----|----------|--------|------|------------|-----------|-----------|
| | | | | | Z (%) | X/R ratio |
| 1 | TR-2 | PKT II | 15 | 11/ 6,6 | 10 | 7,1 |
| 2 | TR-3 | PKT II | 1,5 | 11/ 0,5 | 5 | 7,1 |
| 3 | TR-4 | PKT II | 1,5 | 11/ 0,5 | 5 | 7,1 |
| 4 | TR-5 | PKT II | 1,5 | 11/ 6,6 | 5 | 7,1 |
| 5 | TR-6 | PKT II | 1 | 11/ 0,4 | 5 | 5,79 |
| 6 | TR-7 | PKT II | 0,75 | 11/ 0,5 | 4 | 5,79 |
| 7 | TR-8 | PKT II | 5 | 11/ 6,6 | 6 | 12,4 |
| 8 | TR-9 | PKT II | 5 | 11/ 6,6 | 6 | 12,4 |
| 9 | TR-10 | PKT II | 1,5 | 11/ 0,5 | 5 | 7,1 |
| 10 | TR-11 | PKT II | 5 | 11/ 6,6 | 6 | 12,4 |
| 11 | TR-12 | PKT II | 0,5 | 11/ 0,5 | 5 | 5,1 |

3.5 Sistem Pentanahan

Untuk mengamankan sistem dari gangguan satu fasa dan dua fasa ke tanah pada distribusi sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II)

3.5.1 Pentanahan Generator

Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) menggunakan sistem tegangan 11 kV untuk GTG 36,4 MW Berikut ini adalah data sistem pentanahan generator dapat dilihat pada tabel 3.3

Tabel 3.3 Data sistem pentanahan generator

| no | Generator | Rating Tegangan | Hubungan Belitan | Pentanahan |
|----|-----------|-----------------|------------------|------------|
| 1 | GTG | 11 | Bintang | Resistor |

3.5.2 Sistem Pentanahan Trafo

Sistem pentanahan trafo pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) menggunakan beberapa jenis pentanahan trafo untuk distribusi tenaga listrik. Sistem pentanahan yang digunakan dapat dilihat pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Data sistem pentanahan trafo

| no | Trafo ID | MVA | kV | Hubungan Belitan | Pentanahan |
|----|----------|------|------------|------------------|------------|
| 1 | TR-2 | 15 | 11/ 6,6 | Delta - Bintang | Solid |
| 2 | TR-3 | 1,5 | 11/ 0,5 | Delta - Bintang | Solid |
| 3 | TR-4 | 1,5 | 11/ 0,5 | Delta - Bintang | Solid |
| 4 | TR-5 | 1,5 | 11/ 6,6 | Delta - Bintang | Solid |
| 5 | TR-6 | 1 | 11/ 0,4 | Delta - Bintang | Solid |
| 6 | TR-7 | 0,75 | 11/ 0,5 | Delta - Bintang | Solid |

| no | Trafo ID | MVA | kV | Hubungan Belitan | Pentanahan |
|----|----------|-----|------------|------------------|------------|
| 7 | TR-8 | 5 | 11/ 6,6 | Delta - Bintang | Solid |
| 8 | TR-9 | 5 | 11/ 6,6 | Delta - Bintang | Solid |
| 9 | TR-10 | 1,5 | 11/ 0,5 | Delta - Bintang | Solid |
| 10 | TR-11 | 5 | 11/ 6,6 | Delta - Bintang | Solid |
| 11 | TR-12 | 0,5 | 11/ 0,5 | Delta - Bintang | Solid |

BAB 4

Hasil Simulasi dan Analisis Koordinasi Proteksi PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II)

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan PT.Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II)

Pemodelan sistem Kelistrikan PT Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) dilakukan dengan cara membuat *single line diagram* pada *software* simulasi ETAP 11.0. Dalam membuat *single line diagram* dibutuhkan beberapa data peralatan, yaitu data kabel, trafo, generator, motor, bus, rele dan sistem pentanahan.

Setelah memodelkan sistem dengan membuat *single line diagram* sistem kelistrikan PT Pupuk Kalimantan Timur II kemudian dilakukan analisa hubung singkat $\frac{1}{2}$ cycle untuk mengetahui kemampuan switchgear-1. Pada table 4.1 dapat diketahui hasil dari analisa hubung singkat $\frac{1}{2}$ cycle melebihi kemampuan switchgear-1 pada kondisi sistem kelistrikan *existing*. Kondisi eksisting merupakan kondisi sebelum pemasangan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*), Sehingga Langkah selanjutnya adalah melakukan penambahan SISFCL di kedua sumber arus hubung singkat terbesar, yaitu di feeder setelah K2-TR-01 dan di feeder setelah GTG K2. Dapat di lihat pada table 4.1 dan gambar 4.4.

Tabel 4.1 Data kontribusi feeder saat arus hubung singkat $\frac{1}{2}$ cycle pada swgr-1 kondisi eksisting

| Feeder | Isc. Max $\frac{1}{2}$ cycle (kA) |
|----------|-----------------------------------|
| K2-TR-01 | 11,08 |
| GTG-K2 | 10,03 |
| TR-2 | 0,065 |
| TR-3 | 0,045 |
| TR-4 | 0,045 |
| TR-5 | 0,428 |
| TR-6 | 0,029 |
| TR-7 | 0,044 |

| Feeder | Isc. Max $\frac{1}{2}$ cycle (kA) |
|--------|--------------------------------------|
| TR-8 | 1,14 |
| TR-9 | 1,14 |
| TR-10 | 0,17 |
| TR-11 | 0,951 |

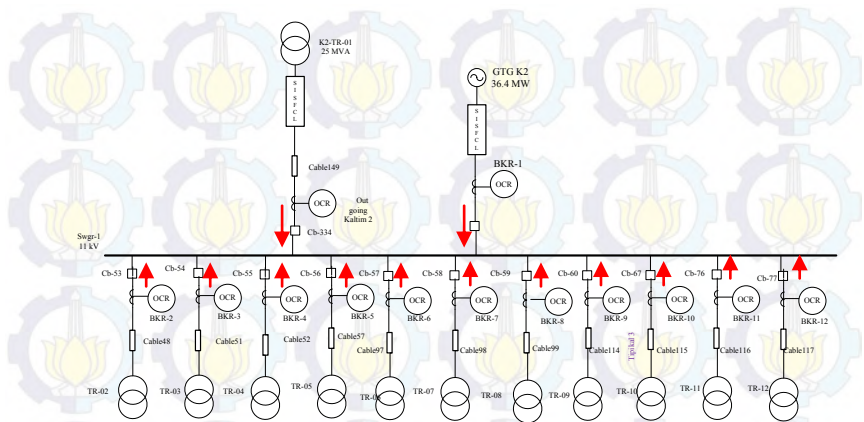
4.2 Analisa Kemampuan Switchgear

Analisa hubung singkat dilakukan pada *switchgear* utama pada PT Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II), yakni di SWGR-1 11 KV dengan mempertimbangkan semua sumber termasuk kontribusi dari motor induksi dan lumped load. Pada tabel 4.1 menunjukkan kemampuan switchgear. Pada tabel 4.2 menunjukkan Arus hubung singkat dan kemampuan busbar switchgear (case 1). Pada tabel 4.3 menunjukkan Arus hubung singkat dan kemampuan busbar switchgear (case 2). Pada tabel 4.4 menunjukkan Arus hubung singkat dan kemampuan busbar switchgear (case 3). Arus hubung singkat yang diperoleh dibandingkan dengan kemampuan switchgear sesaat dalam menahan arus hubung singkat maksimum. Hasil ini kemudian dievaluasi terhadap kemampuan switchgear dengan ketentuan sebagai berikut :

1. Kategori *Normal*, jika arus hubung singkat kurang dari 95% dari rating switchgear.
2. Kategori *Marginal*, jika arus hubung singkat lebih dari 95% dan kurang dari 100% dari rating switchgear.
3. Kategori *Critical*, jika arus hubung singkat lebih dari 100% dari rating switchgear.

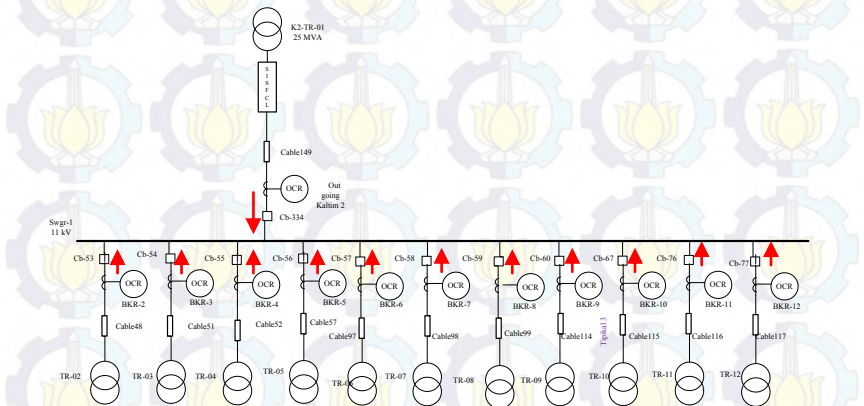
Keterangan case :

- Case 1 merupakan gambaran plant PT. Pupuk Kaltimantan Timur II (PKT II) yang disimulasikan arus hubung singkat dengan menggunakan dua sumber, yaitu sumber trafo K2-TR-01 dan generator GTG-K2.



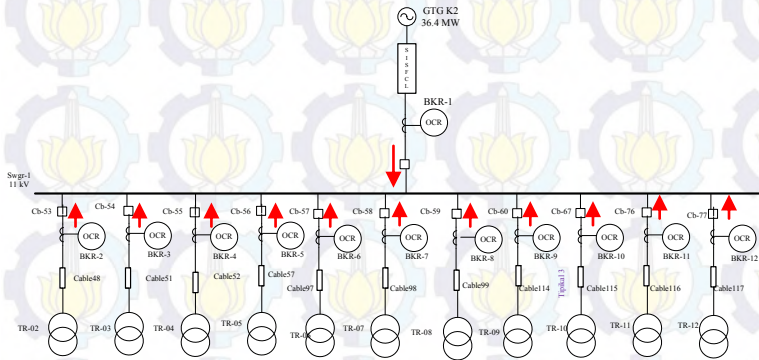
Gambar 4.1 Case 1

- Case 2 merupakan gambaran plant PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) yang disimulasikan arus hubung singkat dengan menggunakan satu sumber, yaitu sumber trafo K2-TR-01.



Gambar 4.2 Case 2

- Case 3 merupakan gambaran plant PT. Pupuk Kaltimantan Timur II (PKT II) yang disimulasikan arus hubung singkat dengan menggunakan satu sumber, yaitu sumber generator GTG-K2.



Gambar 4.3 Case 3

Tabel 4.2 Kemampuan switchgear utama (SWGR-1)

| ID Bus | Asymm kA rms | Asymm kA Peak |
|--------|--------------|---------------|
| SWGR-1 | 23,6 | 37,8 |

Tabel 4.3 Arus hubung singkat dan kemampuan busbar switchgear (case 1)

| ID | kV | Device Capability | | Short-Circuit Current | |
|--------|----|-------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| | | Asymm kA rms | Asymm kA peak | Asymm kA rms | Asymm kA peak |
| SWGR-1 | 11 | 23,6 | 37,8 | 40,623* | 67,471* |

Tabel 4.4 Arus hubung singkat dan kemampuan busbar switchgear (case 2)

| ID | kV | Device Capability | | Short-Circuit Current | |
|--------|----|-------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| | | Asymm kA rms | Asymm kA peak | Asymm kA rms | Asymm kA peak |
| SWGR-1 | 11 | 23,6 | 37,8 | 23,747* | 39,7* |

Tabel 4.5 Arus hubung singkat dan kemampuan busbar switchgear (case 3).

| ID | kV | Device Capability | | Short-Circuit Current | |
|--------|----|-------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| | | Asymm kA rms | Asymm kA peak | Asymm kA rms | Asymm kA peak |
| SWGR-1 | 11 | 23,6 | 37,8 | 22,999 | 37,8* |

Catatan:

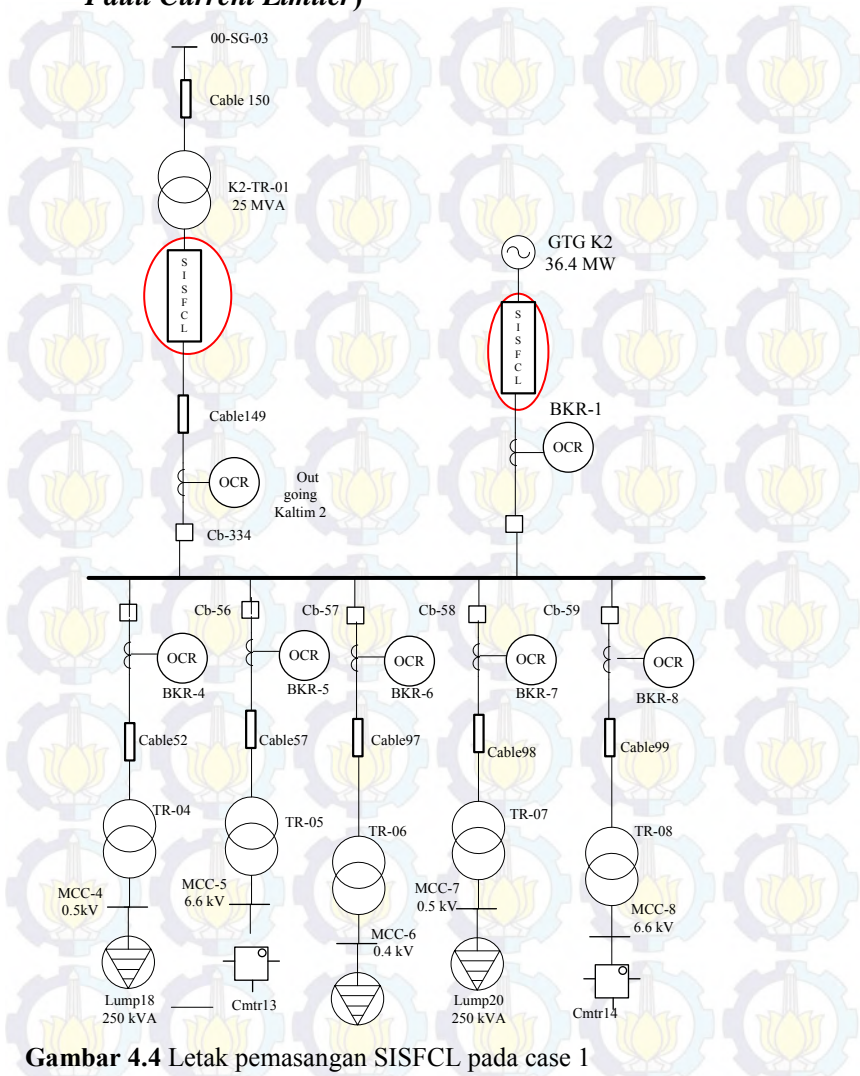
* kemampuan switchgear pada kondisi (*Critical*)

Berdasarkan tabel diatas menunjukkan bahwa analisa hubung singkat pada case 1, case 2, case 3 melebihi rating kemampuan switchgear. Sehingga diperlukan suatu pembatas arus. Sehingga pada tugas akhir ini akan dilakukan studi analisa pembatasan arus dengan menggunakan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*)

4.3 Membatasi arus hubung singkat dengan SISFCL(*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*)

Berdasarkan tabel 4.4 diatas dapat diketahui bahwa letak pemasangan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*) terletak pada pada transformator K2-TR-01 dan generator GTG-K2. SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*) akan membatasi arus kontribusi dari transformator K2-TR-01 dan generator GTG-K2 yang merupakan sumber arus kontribusi terbesar.

4.3.1 Peletakan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*)



Gambar 4.4 Letak pemasangan SISFCL pada case 1

Gambar 4.4 merupakan gambar peletakan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*) pada case 1 dimana

SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*) yang ke-1 di letakkan setelah transformator K2-TR-01 dan SISFCL yang ke-2 di letakkan setelah generator GTG-K2. Karena pada feeder transformator K2-TR-01 dan generator GTG-K2 merupakan penyumbang arus hubung singkat ½ cycle terbesar.

4.3.2 Perhitungan Impedansi SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*)

Rumus Perhitungan impedansi SISFCL :

$$\begin{aligned} \text{Impedansi SISFCL} &= \frac{V_{\text{bus}}}{\sqrt{3}} \times \left(\frac{1}{I_a} - \frac{1}{I_b} \right) \\ &= \frac{11}{\sqrt{3}} \times \left(\frac{1}{I_a} - \frac{1}{I_b} \right) \end{aligned}$$

Keterangan :

V_{bus} : Rating tegangan Swithgear (kV)

I_a : Arus kontribusi hubung singkat yang di inginkan (kA)

I_b : Arus kontribusi hubung singkat di bus yang terjadi gangguan.
(kA)

Perhitungan impedansi SISFCL pada pembatasan arus kontribusi dari transformator K2-TR-01 :

$$\begin{aligned} \text{Impedansi SISFCL} &= \frac{V_{\text{bus}}}{\sqrt{3}} \times \left(\frac{1}{I_a} - \frac{1}{I_b} \right) \\ &= \frac{11}{\sqrt{3}} \times \left(\frac{1}{4.13} - \frac{1}{11.08} \right) = 0.964 \end{aligned}$$

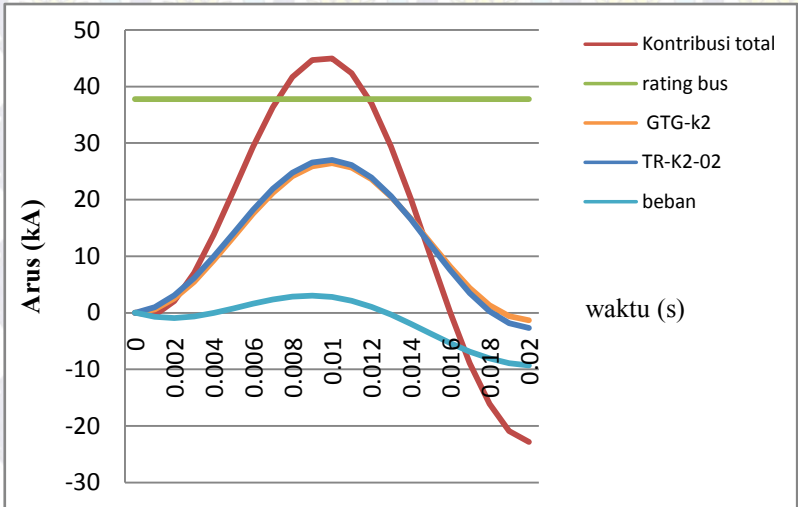
Perhitungan impedansi SISFCL pada pembatasan arus kontribusi dari GTG-k2.

$$\begin{aligned} \text{Impedansi SISFCL} &= \frac{V_{\text{bus}}}{\sqrt{3}} \times \left(\frac{1}{I_a} - \frac{1}{I_b} \right) \\ &= \frac{11}{\sqrt{3}} \times \left(\frac{1}{5.02} - \frac{1}{10.03} \right) = 0.63 \end{aligned}$$

4.3.3 Analisa Pembatasan arus dengan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*)

SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*) bekerja mendeteksi gangguan pada waktu 0,001 sekon dan dapat membatasi arus pada 0,005 sekon. Pada gambar 4.5 menunjukkan bahwa arus hubung singkat ½ cycle di swgr-1 melebihi *device capability*

dari switchgear tanpa menggunakan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*). Gambar 4.5 dan gambar 4.6 ini menggunakan metode transien IEC 61363.



Gambar 4.5 Grafik sebelum pemasangan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*)

Nilai arus pada case 1, case 2, case 3 setelah adanya pemasangan SISFCL.

Tabel 4.6 Arus hubung singkat dan kemampuan busbar switchgear (case 1)

| ID | kV | Device Capability | | Short-Circuit Current | |
|--------|----|-------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| | | Asymm kA rms | Asymm kA peak | Asymm kA rms | Asymm kA peak |
| SWGR-1 | 11 | 23,6 | 37,8 | 21,595 | 35,751 |

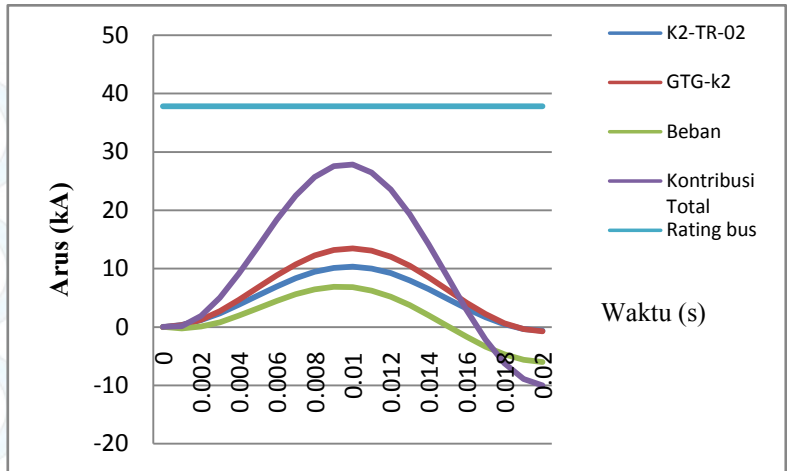
Tabel 4.7 Arus hubung singkat dan kemampuan busbar switchgear (case 2)

| ID | kV | Device Capability | | Short-Circuit Current | |
|--------|----|-------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| | | Asymm kA rms | Asymm kA peak | Asymm kA rms | Asymm kA peak |
| SWGR-1 | 11 | 23,6 | 37,8 | 13,160 | 21,870 |

Tabel 4.8 Arus hubung singkat dan kemampuan busbar switchgear (case 3).

| ID | kV | Device Capability | | Short-Circuit Current | |
|--------|----|-------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| | | Asymm kA rms | Asymm kA peak | Asymm kA rms | Asymm kA peak |
| SWGR-1 | 11 | 23,6 | 37,8 | 14,828 | 24,554 |

Berdasarkan tabel diatas menunjukkan bahwa setelah pemasangan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*) arus hubung singkat pada SWGR-1 semakin berkurang dan tidak melebihi rating kemampuan *switchgear* sehingga *switchgear* masih dalam keadaan aman.



Gambar 4.6 Grafik setelah pemasangan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*)

Pada gambar 4.6 menunjukkan grafik setelah pemasangan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*) yang mengakibatkan arus hubung singkat menjadi turun sehingga *switchgear* tetap aman.

Tabel 4.9 Perbandingan nilai hubung singkat sebelum dan sesudah pemasangan SISFCL

| Feeder | Isc. Max ½ cycle (kA) sebelum pemasangan SISFCL | Isc. Max ½ cycle (kA) setelah pemasangan SISFCL |
|----------|---|---|
| K2-TR-01 | 11,08 | 4,13 |
| GTG-K2 | 10,03 | 5,02 |
| TR-2 | 0,065 | 0,065 |
| TR-3 | 0,045 | 0,045 |
| TR-4 | 0,045 | 0,045 |
| TR-5 | 0,428 | 0,428 |

| Feeder | Isc. Max $\frac{1}{2}$ cycle (kA) sebelum pemasangan SISFCL | Isc. Max $\frac{1}{2}$ cycle (kA) setelah pemasangan SISFCL |
|--------|---|---|
| TR-6 | 0,029 | 0,029 |
| TR-7 | 0,044 | 0,044 |
| TR-8 | 1,14 | 1,14 |
| TR-9 | 1,14 | 1,14 |
| TR-10 | 0,17 | 0,17 |
| TR-11 | 0,951 | 0,951 |

Pada tabel 4.9 dapat dilihat bahwa arus kontribusi hubung singkat $\frac{1}{2}$ cycle pada feeder K2-TR-01 dari 11,08 kA menjadi 4,13kA, Sedangkan pada feeder GTG K-2 dari 10,02 kA menjadi 5,02 kA. Ini membuktikan bahwa arus kontribusi hubung singkat yang besar dapat dibatasi dengan adanya SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*).

4.4 Koordinasi proteksi

Dengan adanya pemasangan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*) mengakibatkan arus hubung singkat pada swgr-1 semakin kecil sehingga perlu dilakukan setting ulang dengan menggunakan koordinasi proteksi arus lebih.

4.5 Pemilihan Tipikal Koordinasi *Setting* Rele pengaman pada PT.Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II)

Dalam *setting* rele pengaman untuk mempermudah *setting* koordinasi rele pengaman, maka dipilih beberapa tipikal dari masing-masing plant utama PT Pupuk K alimantan Timur II (PKT II), yaitu

1. Koordinasi pengaman dari generator GTG k2 sampai trafo TR-2 untuk system koordinasi rele pengaman arus lebih gangguan fasa pada PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II). Pemilihan tipikal ini atas dasar pembebanan terbesar dengan sumber yang berbeda. Pada tipikal ini terdapat dua rele pengaman yaitu rele BKR-1 dan rele BKR-2 dan terdiri dari dua level tegangan yaitu 11 kV dan 6.6 kV.

2. Koordinasi pengaman dari trafo K2-Tr-01 sampai trafo TR-2 untuk system koordinasi rele pengaman arus lebih gangguan fasa pada PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II). Pemilihan tipikal ini atas dasar pembebanan terbesar dengan sumber yang berbeda. Pada tipikal ini terdapat dua rele pengaman yaitu rele out going kaltim 2 dan rele BKR-2 dan terdiri dari dua level tegangan yaitu 11 kV dan 6.6 kV.
3. Koordinasi pengaman dari generator GTG k2 sampai trafo TR-8 untuk system koordinasi rele pengaman arus lebih gangguan fasa pada PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II). Pemilihan tipikal ini atas dasar pembebanan 5 MVA . Pada tipikal ini terdapat dua rele pengaman yaitu rele BKR-1 dan rele BKR-8 dan terdiri dari dua level tegangan yaitu 11 kV dan 6.6 kV.
4. Koordinasi pengaman dari trafo K2-Tr-01 sampai trafo TR-6 untuk system koordinasi rele pengaman arus lebih gangguan fasa pada PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II). Pemilihan tipikal ini atas dasar pembebanan 1 MVA. Pada tipikal ini terdapat dua rele pengaman yaitu rele out going kaltim 2 dan rele BKR-6 dan terdiri dari dua level tegangan yaitu 11 kV dan 0.4 kV.

4.6 Analisis Arus Hubung Singkat

Setelah dilakukan analisis load flow pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II), maka langkah selanjutnya yang dilakukan adalah melakukan analisis hubung singkat (*short circuit*), analisis ini digunakan untuk menentukan *setting* rele arus lebih. Terdapat dua paramter yang digunakan dalam menghitung arus hubung singkat, yaitu arus hubung singkat maksimum dan arus hubung singkat minimum. Hubung singkat maksimum adalah hubung singkat 3 fasa ke tanah pada saat 4 *cylce* dan hubung singkat minimum adalah hubung singkat antar fasa pada saat 30 *cycle*.

4.6.1 Hubung Singkat Maksimum

Hubung singkat maksimum terajadi pada saat semua generator PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) bekerja pada keadaan normal. Hubung singkat maksimum 4 cycle digunakan untuk *setting* rele dan *setting* kelambatan waktu 0,08-0,5s. Hubung singkat maksimum digunakan sebagai batasan arus hubung singkat terbesar yang mungkin terjadi. Pada simulasi gangguan hubung singkat maksimum dilakukan

pada bus-bus dalam tipikal yang telah dipilih. Hasil simulasi hubung singkat maksimum dapat dilihat pada tabel 4.9

Tabel 4.10 Data hubung singkat maksimum 4 *cycle*

| no | Bus | Tegangan (kV) | Isc.max 4cylce (kA) |
|----|---------------------|---------------|---------------------|
| 1 | Swgr-1 | 11 | 11,58 |
| 2 | Kontribusi TR-K2-01 | 6.6 | 4,09 |
| 3 | Kontribusi GTG-K2 | 6.6 | 5,02 |

4.6.2 Hubung Singkat Minimum

Hubung Singkat minimum terjadi pada saat generator interkoneksi PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) bekerja normal dan GTG dalam keadaan tidak bekerja. Hubung singkat minimum 30 *cycle* digunakan untuk menentukan *setting* rele arus lebih instan. Sehingga apabila terjadi gangguan hubung singkat pada arus gangguan minimum, rele tersebut dapat bekerja secara instan atau sesuai dengan *settingtime delay* yang telah ditentukan. Pada simulasi gangguan hubung singkat minimum dilakukan pada bus-bus dalam tipikal yang telah dipilih. Hasil simulasi hubung singkat minimum dapat dilihat pada tabel 4.10

Tabel 4.11 Data hubung singkat minimum 30 *cycle*

| no | Bus | Tegangan (kV) | Isc.min 30cylce (kA) |
|----|---------------------|---------------|----------------------|
| 1 | Swgr-1 | 11 | 3,36 |
| 2 | Kontribusi TR-K2-01 | 11 | 3,36 |
| 3 | Kontribusi GTG-K2 | 11 | 5 |

4.7 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa

Koordinasi rele arus lebih gangguan fasa adalah pemilihan pada peralatan pengaman yang memiliki tujuan untuk mengisolasi suatu sistem pada saat terjadi rele gangguan arus lebih fasa saja. Gangguan yang terjadi dapat berupa gangguan beban lebih dan gangguan hubung singkat. Sehingga setelan koordinasi proteksi yang tepat diperlukan untuk menjaga stabilitas dan kontinuitas daya listrik.

Pada koordinasi rele arus lebih dilakukan *setting* arus dan waktu pada rele arus lebih (50/51). Pada perhitungan *setting* rele arus lebih ini akan dihiutng nilai *low set*, *higt set*, *time dial* dan untuk *time delay* dipilih *grading time* 0,2 s.

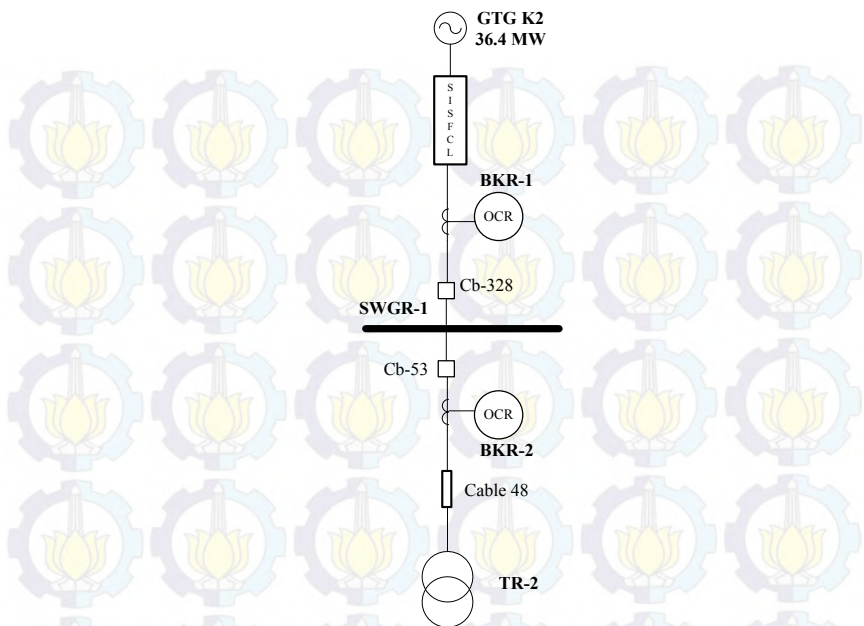
Setelah perhitungan nilai-nilai untuk *setting* rele arus lebih telah didapatkan, langkah selanjutnya adalah plot *Time current curve* pada *softwaresimulasi* ETAP 11.0. Sehingga dapat diketahui *setting* koordinasi yang tepat. Pada koordinasi rele harus memperhatikan arus *starting* motor dan arus pengisian (*inrush current*) pada trafo.

4.7.1 Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 1

Koordinasi rele arus lebih fasa tipikal 1 terdiri dari dua rele pengaman yaitu rele BKR-1 dan rele BKR-2. Pada gambar 4.7 adalah gambar koordinasi rele tipikal 1.

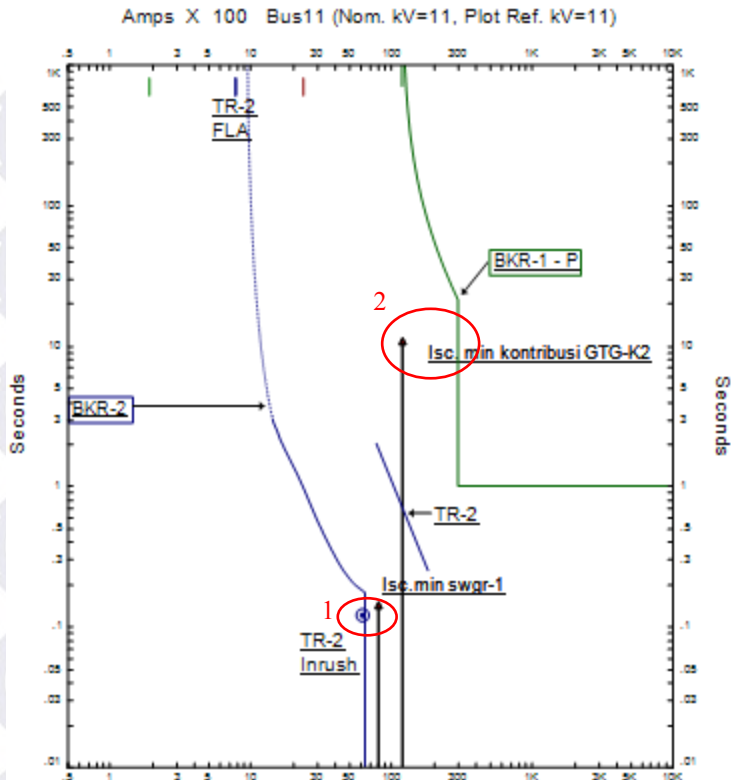
Tabel 4.12 Data existing

| Relay ID & Model | CT Ratio | Setting | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------------------------|---------------------|
| BKR-2 Toshiba ICO3 | 1200 : 5 | <i>Curve Type</i> | <i>Very Inverse</i> |
| | | <i>Pickup Range</i> | 2-8 sec-5A |
| | | <i>Pickup</i> | 4 |
| | | <i>Time Dial</i> | 1 |
| | | <i>Instantaneous Pickup Range</i> | 10-40 sec-5A |
| | | <i>Pickup</i> | 27.26 |
| BKR-1 GE-Multilin | 3000 : 5 | <i>Curve Type</i> | IAC- Inverse |
| | | <i>Pickup Range</i> | 0,05-2,4xCT Sec |
| | | <i>Pickup</i> | 4 |
| | | <i>Time Dial</i> | 5 |
| | | <i>Instantaneous Pickup Range</i> | 1 – 31 x51 |
| | | <i>Pickup</i> | 10 |
| | | <i>Delay</i> | 1 |



Gambar 4.7 Koordinasi rele tipikal 1

Pada koordinasi tipikal 1 terdapat beberapa koordinasi rele pengaman yang masih harus disempurnakan, hal ini dapat dilihat pada kurva arus waktu pada gambar 4.8 yang ditandai dengan lingkaran berwarna merah.



Gambar 4.8 Kurva koordinasi arus waktu *existing* tipikal 1

Berikut ini keterangan dari lingkaran merah pada gambar 4.8 :

1. Pada saat trafo TR-2 starting, rele akan bekerja karena setting kurva definit dari rele BKR-2 sangat mendekati dari inrush trafo TR-2.
2. Saat terjadi arus hubung singkat minimum di generator GTG-K2, kurva dari rele BKR-1 tidak mengenai dari arus hubung singkat tersebut, sehingga rele tidak dapat bekerja.

Dari analisis kurva *existing* dapat diketahui bahwa *setting* rele masih perlu disempurnakan agar bisa didapatkan koordinasi rele pengaman yang tepat. Perhitungan ulang *setting* rele adalah sebagai berikut :

☑ Rele BKR-2

Manufacturer

: Toshiba

Model

: ICO3

Curve Type

: *Very Inverse Time*

CT ratio

: 1200 / 5

Isc min bus SWGR-1

: 3,36 kA

Isc max bus SWGR-1

: 11,58 kA

FLA TR-02

: 7,87 A

Time Overcurrent Pickup

$$\frac{1,05 \times \text{FLA TR-2}}{\text{CT ratio}} \leq \text{Iset} \leq \frac{0,8 \times \text{Isc.Min bus SWGR-1}}{\text{CT ratio}} \text{ A}$$

$$\frac{1,05 \times 787,3}{1200/5} \text{ A} \leq \text{Iset} \leq \frac{0,8 \times 3360}{1200/5} \text{ A}$$

$$3,44 \text{ A} \leq \text{Iset} \leq 11,2 \text{ A}$$

Dipilih Tap = 4 A (*PickupRange 2 A – 8 A*)

$$\text{Iset} = 4 \times 1200/5 = 960 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi = 0,1 s

$$t = \frac{K \times T_d}{\beta \times \left[\left(\frac{I}{I_{EB}} \right)^a - 1 \right]}$$

$$T_d = \frac{t \times \beta \times \left[\left(\frac{I}{I_{EB}} \right)^a - 1 \right]}{K}$$

$$T_d = \frac{t \times \beta \times \left[\left(\frac{\text{Isc Max Swgr-1}}{\text{tap} \times \text{CT primary}} \right)^1 - 1 \right]}{80}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 1,5 \times \left[\left(\frac{11580}{4 \times \frac{1200}{5}} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

$$T_d = 0,123$$

$T_d \geq 0,123$ dipilih $T_d = 1$ (*Range T_d 1-10, dengan step 1*)

☑ Rele BKR-1

Manufacturer

: GE-Multilin

Model

: G60

Curve Type

: *Very Inverse Time*

| | |
|---------------------------|------------|
| <i>CT ratio</i> | : 3000 / 5 |
| Isc.min kontribusi GTG K2 | : 5 kA |
| Isc.max kontribusi GTG K2 | : 5,02 kA |
| FLA GTG-k2 | : 2388 A |

Time Overcurrent Pickup

$$\frac{1,05 \times \text{FLA GTG K2}}{CT_{\text{primer}}} I_n \leq I_{\text{set}} \leq \frac{0,8 \times \text{Isc min kontribusi GTG K2}}{CT_{\text{primer}}} I_n$$

$$\frac{1,05 \times 2388}{3000} I_n \leq I_{\text{set}} \leq \frac{0,8 \times 5000}{3000} I_n$$

$$0,83 I_n \leq I_{\text{set}} \leq 1,33 I_n$$

Dipilih Tap = I_n

$I_{\text{set}} = 1 \times 3000 = 3000 \text{ A}$ (*Pickup Range* $0,01 I_n - 30 I_n$, dengan *Step* $0,001 I_n$)

Time Dial

Dipilih waktu operasi = 0,4 s

$$t = \frac{K \times T_d}{\beta \times \left[\left(\frac{1}{I_{\text{EB}}} \right)^\alpha - 1 \right]}$$

$$T_d = \frac{t \times \beta \times \left[\left(\frac{1}{I_{\text{EB}}} \right)^\alpha - 1 \right]}{K}$$

$$T_d = \frac{t \times \beta \times \left[\left(\frac{\text{Isc Max kontribusi GTG K2}}{\text{tap} \times CT_{\text{primary}}} \right)^\alpha - 1 \right]}{13,5}$$

$$T_d = \frac{0,4 \times 1,5 \times \left[\left(\frac{5020}{1 \times 3000} \right)^\alpha - 1 \right]}{13,5}$$

$$T_d = 0,12$$

$T_d \geq 0,12$ dipilih $T_d = 0,3$ (*Range* T_d $0,01-600$, dengan *step* $0,01$)

Instantaneous Pickup

$$I_{\gg} \leq \frac{0,8 \times \text{Isc min kontribusi GTG K2}}{CT_{\text{primer}}} I_n$$

$$I_{\gg} \leq \frac{0,8 \times 5000}{3000} I_n$$

$$I_{\gg} \leq 1,33 I_n$$

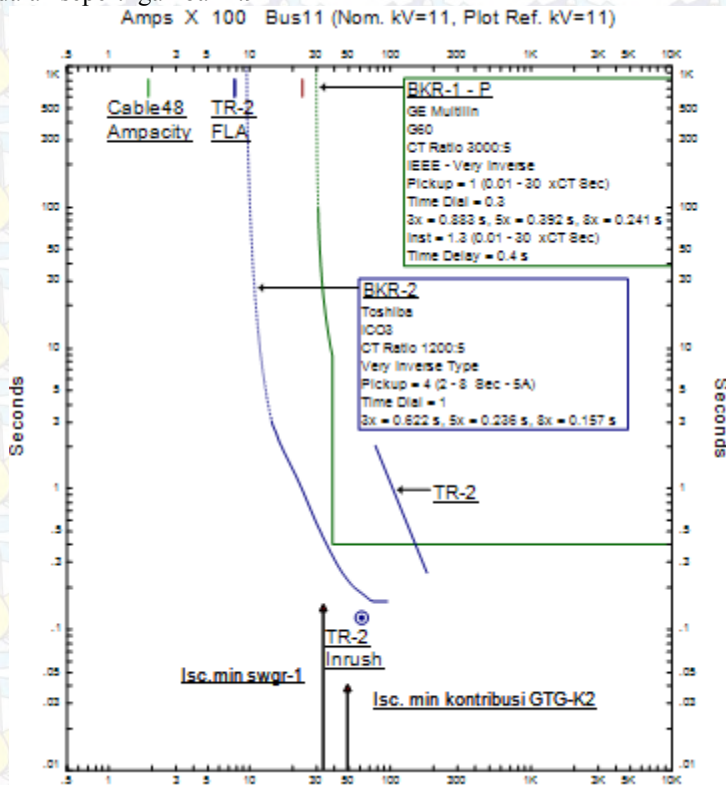
Dipilih Tap = $1,3 I_n$ (*Pickup Range* $0,01 I_n - 30 I_n$, dengan *Step* $0,01 I_n$)

$$I_{\gg} = 3900 \text{ A}$$

Time Delay

$\text{Time delay} = 0,4 \text{ s}$

Dengan menggunakan hasil perhitungan diatas, maka dapat di *plot* kurva arus waktu kondisi *resetting* pada *software* simulasi. Dan hasilnya adalah seperti gambar 4.9



Gambar 4.9 Kurva koordinasi arus waktu *resetting* tipikal 1

Tabel 4.13 Data *resetting*

| <i>Relay ID & Model</i> | <i>CT Ratio</i> | <i>Setting</i> | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------------------------|---------------------|
| | | <i>Curve Type</i> | <i>Very Inverse</i> |
| BKR-2 Toshiba ICO3 | 1200 : 5 | <i>Pickup Range</i> | 2-8 sec-5A |
| | | <i>Pickup</i> | 4 |
| | | <i>Time Dial</i> | 1 |
| | | <i>Instantaneous Pickup Range</i> | - |
| | | <i>Pickup</i> | - |
| | | | |
| BKR-1 GE-Multilin | 3000 : 5 | <i>Curve Type</i> | <i>Very Inverse</i> |
| | | <i>Pickup Range</i> | 0.01-30 xCT Sec |
| | | <i>Pickup</i> | 1 |
| | | <i>Time Dial</i> | 0.3 |
| | | <i>Instantaneous Pickup Range</i> | 0.01-30 xCT Sec |
| | | <i>Pickup</i> | 1.3 |
| | | <i>Delay</i> | 0.4 |

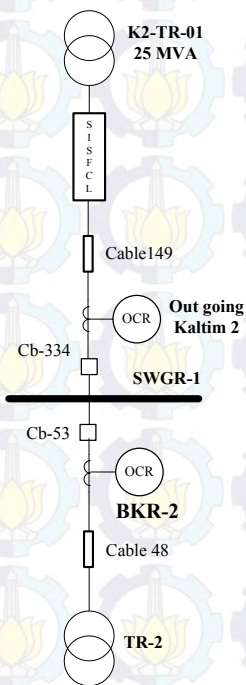
4.7.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 2

Pada tipikal 2 terdiri dari 2 *high voltage circuit breaker*. Rele yang akan dikoordinasikan adalah rele Out Going K-2 dan rele BKR-2. Tipikal 2 dapat dilihat pada gambar 4.10.

Tabel 4.14 Data *existing*

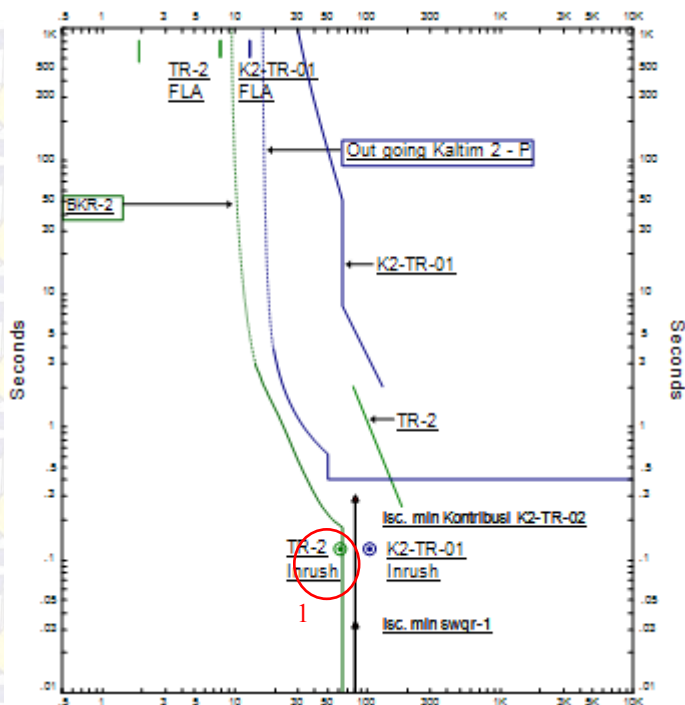
| <i>Relay ID & Model</i> | <i>CT Ratio</i> | <i>Setting</i> | |
|--|-----------------|-----------------------------------|---------------------------|
| | | <i>Curve Type</i> | <i>Very Inverse</i> |
| BKR-2 Toshiba ICO3 | 1200 : 5 | <i>Pickup Range</i> | 2-8 sec-5A |
| | | <i>Pickup</i> | 4 |
| | | <i>Time Dial</i> | 1 |
| | | <i>Instantaneous Pickup Range</i> | 10-40 sec-5A |
| | | <i>Pickup</i> | 27,26 |
| | | | |
| Out Going Kaltim-2 Merlin Gerin Sepam 1000 | 3000 : 5 | <i>Curve Type</i> | Standar <i>Inverse</i> |
| | | <i>Pickup Range</i> | 0,3-2.4xCT Sec |

| <i>Relay ID & Model</i> | <i>CT Ratio</i> | <i>Setting</i> | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|
| | | <i>Pickup</i> | 0,55 |
| | | <i>Time Dial</i> | 0,3 |
| | | <i>Instantaneous Pickup Range</i> | 1 – 24 x CT sec |
| | | <i>Pickup</i> | 1,7 |
| | | <i>Delay</i> | 0,4 |



Gambar 4.10 Koordinasi rele tipikal 2

Pada koordinasi rele tipikal 2 masih perlu disempurnakan. Hal itu ditandai dengan lingkaran merah yang berada pada kurva arus waktu pada gambar 4.11.



Gambar 4.11 Kurva koordinasi arus waktu *existing* tipikal 2

Berikut ini merupakan keterangan pada lingkaran pada gambar 4.11:

1. Pada saat trafo TR-2 starting, rele akan bekerja karena setting kurva definit dari rele BKR-2 sangat mendekati dari inrush trafo TR-2.

Dari analisis kurva *existing* dapat diketahui bahwa *setting* rele masih perlu disempurnakan agar bisa didapatkan koordinasi rele pengaman yang tepat. Perhitungan ulang *setting* rele adalah sebagai berikut :

☑ Rele BKR-2

Manufacturer : Toshiba

Model : ICO3

| | |
|--------------------|----------------------------|
| <i>Curve Type</i> | : <i>Very Inverse Time</i> |
| <i>CT ratio</i> | : 1200 / 5 |
| Isc min bus SWGR-1 | : 3,36 kA |
| Isc max bus SWGR-1 | : 11,58 kA |
| FLA TR-02 | : 7,87 A |

Time Overcurrent Pickup

$$\frac{1,05 \times \text{FLA TR-2}}{\text{CT ratio}} A \leq I_{set} \leq \frac{0,8 \times \text{Isc.Min bus SWGR-1}}{\text{CT ratio}} A$$

$$\frac{1,05 \times 787,3}{1200/5} A \leq I_{set} \leq \frac{0,8 \times 3360}{1200/5} A$$

$$3,44 A \leq I_{set} \leq 11,2 A$$

Dipilih Tap = 4 A (*Pickup Range* 2 A – 8 A)

$$I_{set} = 4 \times 1200/5 = 960 A$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi = 0,1 s

$$t = \frac{K \times T_d}{\beta \times \left[\left(\frac{I}{I_{EB}} \right)^\alpha - 1 \right]}$$

$$T_d = \frac{t \times \beta \times \left[\left(\frac{I}{I_{EB}} \right)^\alpha - 1 \right]}{K}$$

$$T_d = \frac{t \times \beta \times \left[\left(\frac{\text{Isc Max Swgr-1}}{\text{tap} \times \text{CT primary}} \right)^1 - 1 \right]}{80}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 1,5 \times \left[\left(\frac{11580}{4 \times \frac{1200}{5}} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

$$T_d = 0,123$$

$T_d \geq 0,123$ dipilih $T_d = 1$ (*Range* T_d 1-10, dengan *step* 1)

☑ Rele Out Going Kaltim-2

| | |
|-----------------------------|---------------------------|
| <i>Manufacturer</i> | : Merlin Gerin |
| <i>Model</i> | : Sepam 1000 |
| <i>Curve Type</i> | : <i>Standard Inverse</i> |
| <i>CT ratio</i> | : 2500/ 1 |
| Isc.min Kontribusi K2-TR-01 | : 3,36 kA |
| Isc.max Kontribusi K2-TR-01 | : 4,09 kA |
| FLA Sekunder Trafo K2-TR-01 | : 1312 A |

Time Overcurrent Pickup

$$\frac{1,05 \times \text{FLA K2-TR-01}}{\text{CT primer}} I_n \leq I_{set} \leq \frac{0,8 \times I_{sc \text{ min kontribusi K2-TR-01}}}{\text{CT primer}} I_n$$

$$\frac{1,05 \times 1312}{2500} I_n \leq I_{set} \leq \frac{0,8 \times 3360}{2500} I_n$$

$$0,55 I_n \leq I_{set} \leq 1,07 I_n$$

Dipilih $I_{tap} = 0,6 I_n$ (*Pickup Range* $0,3 I_n - 2,4 I_n$, dengan *Step* $0,05 I_n$)
 $I_{set} = 0,6 \times 2500 = 1500 \text{ A}$

Time Dial

Dipilih waktu operasi = $0,7 \text{ s}$

$$t = \frac{K \times T_d}{\beta \times \left[\left(\frac{I}{I_{EB}} \right)^\alpha - 1 \right]}$$

$$T_d = \frac{t \times \beta \times \left[\left(\frac{I}{I_{EB}} \right)^\alpha - 1 \right]}{K}$$

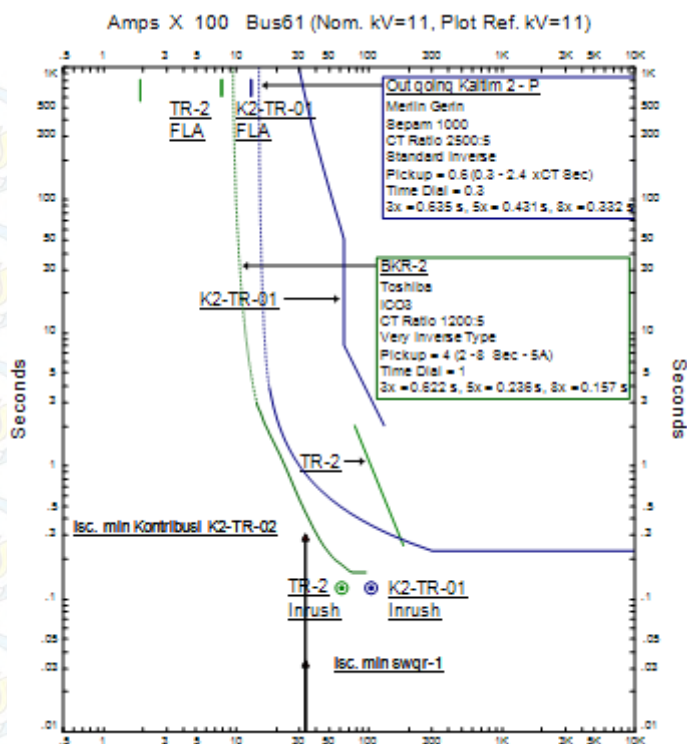
$$T_d = \frac{t \times \beta \times \left[\left(\frac{I_{sc \text{ Max kontribusi K2-TR-02}}{\text{tap} \times \text{CT primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{K}$$

$$T_d = \frac{0,4 \times 2,97 \times \left[\left(\frac{4090}{1 \times 2500} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,14$$

$T_d \geq 0,14$ dipilih $T_d = 0,3$ (*Range* T_d $0,01-600$, dengan *step* $0,01$)

Dengan menggunakan hasil perhitungan diatas, maka dapat di *plot* kurva arus waktu kondisi *resetting* pada *software* simulasi. Dan hasilnya adalah seperti gambar 4.12.



Gambar 4.12 Kurva koordinasi arus waktu *resetting* tipikal 2

Tabel 4.15 Data *resetting*

| Relay ID & Model | CT Ratio | Setting | |
|--|----------|----------------------------|-------------------|
| | | Curve Type | Very Inverse |
| BKR-2 Toshiba ICO3 | 1200 : 5 | Pickup Range | 2-8 sec-5A |
| | | Pickup | 4 |
| | | Time Dial | 1 |
| | | Instantaneous Pickup Range | - |
| | | Pickup | - |
| | | | |
| Out Going Kaltim-2 Merlin Gerin Sepam 1000 | 2500 : 5 | Curve Type | Standar Inverse - |
| | | Pickup Range | 0.3-2.4xCT Sec |
| | | Pickup | 0.6 |
| | | Time Dial | 0.3 |
| | | Instantaneous Pickup Range | - |
| | | Pickup | - |
| | | Delay | - |

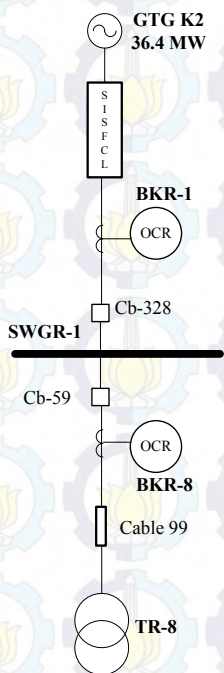
4.7.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 3

Pada tipikal 3 terdiri dari 2 *high voltage circuit breaker*, rele-rele yang akan dikoordinasikan adalah rele BKR-1 dan rele BKR-8. Tipikal 3 dapat dilihat pada gambar 4.13.

Tabel 4.16 Data *existing*

| Relay ID & Model | CT Ratio | Setting | |
|--------------------------|----------|----------------------------|--------------|
| | | Curve Type | Very Inverse |
| BKR-8 Toshiba ICO3 | 400 : 5 | Pickup Range | 4-16 sec-5A |
| | | Pickup | 16 |
| | | Time Dial | 2 |
| | | Instantaneous Pickup Range | 20-80 sec-5A |
| | | Pickup | 60 |
| | | | |
| BKR-1 GE-Multilin | 3000 : 5 | Curve Type | IAC- Inverse |
| | | Pickup Range | 0,05-2,4xCT |

| <i>Relay ID & Model</i> | <i>CT Ratio</i> | <i>Setting</i> | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------------------------|------------|
| | | | <i>Sec</i> |
| | | <i>Pickup</i> | 4 |
| | | <i>Time Dial</i> | 5 |
| | | <i>Instantaneous Pickup Range</i> | 1 – 31 x51 |
| | | <i>Pickup</i> | 10 |
| | | <i>Delay</i> | 1 |



Gambar 4.13 Koordinasi rele tipikal 3

Pada koordinasi rele tipikal 3 masih perlu disempurnakan. Hal itu ditandai dengan lingkaran merah yang berada pada kurva arus waktu pada gambar 4.14.

Dari analisis kurva *existing* dapat diketahui bahwa *setting* rele masih perlu disempurnakan agar bisa didapatkan koordinasi rele pengaman yang tepat. Perhitungan ulang *setting* rele adalah sebagai berikut :

☑ Rele BKR-8

Manufacturer : Toshiba

Model : ICO3

Curve Type : *Very Inverse Time*

CT ratio : 400 / 5

Isc min bus SWGR-1 : 3,36 kA

Isc max bus SWGR-1 : 11,58 kA

FLA Primer Trafo TR-8 : 262,4 A

Time Overcurrent Pickup

$$\frac{1,05 \times \text{FLA Trafo TR-8}}{\text{CT ratio}} \text{ A} \leq \text{Iset} \leq \frac{0,8 \times \text{Isc.Min bus SWGR-1}}{\text{CT ratio}} \text{ A}$$

$$\frac{1,05 \times 26,4}{400/5} \text{ A} \leq \text{Iset} \leq \frac{0,8 \times 3360}{400/5} \text{ A}$$

$$3,44 \text{ A} \leq \text{Iset} \leq 33,6 \text{ A}$$

Dipilih Tap = 4 A (*PickupRange* 4 A – 16 A)

$$\text{Iset} = 4 \times 400/5 = 320 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi = 0,1 s

$$t = \frac{K \times \text{Td}}{\beta \times \left[\left(\frac{1}{\text{IEB}} \right)^\alpha - 1 \right]}$$

$$\text{Td} = \frac{t \times \beta \times \left[\left(\frac{1}{\text{IEB}} \right)^\alpha - 1 \right]}{K}$$

$$\text{Td} = \frac{t \times \beta \times \left[\left(\frac{\text{Isc Max SWGR-1}}{\text{tap} \times \text{CT primary}} \right)^\alpha - 1 \right]}{K}$$

$$\text{Td} = \frac{80 \times 0,1 \times 1,5 \times \left[\left(\frac{11580}{4 \times \frac{400}{5}} \right)^1 - 1 \right]}{1,5}$$

$$\text{Td} = 0,39$$

$\text{Td} \geq 0,39$ dipilih $\text{Td} = 1$ (*Range* Td 1-10, dengan *step* 1)

Instantaneous Pickup

$$I_{>>} \leq \frac{0,8 \times I_{sc} \text{ Min bus SWGR-1}}{CT \text{ ratio}}$$
$$I_{>>} \leq \frac{0,8 \times 3360}{400/5}$$
$$I_{>>} \leq 33,6 \text{ A}$$

Dipilih Tap = 33 (*Pickup Range* 20 – 80A, dengan *Step* 0,01A)
 $I_{>>} = 2640 \text{ A}$

Time Delay

Time delay = 0,1 s

☑ Rele BKR-1

Manufacturer : GE-Multilin
Model : G60
Curve Type : *Very Inverse Time*
CT ratio : 3000 / 5
Isc.min kontribusi GTG K2 : 5 kA
Isc.max kontribusi GTG K2 : 5,02 kA
FLA GTG-k2 : 2388 A

Time Overcurrent Pickup

$$\frac{1,05 \times FLA \text{ GTG K2}}{CT_{\text{primer}}} I_n \leq I_{\text{set}} \leq \frac{0,8 \times I_{sc} \text{ min kontribusi GTG K2}}{CT_{\text{primer}}} I_n$$
$$\frac{1,05 \times 2388}{3000} I_n \leq I_{\text{set}} \leq \frac{0,8 \times 5000}{3000} I_n$$
$$0,83 I_n \leq I_{\text{set}} \leq 1,33 I_n$$

Dipilih Tap = I_n
 $I_{\text{set}} = 1 \times 3000 = 3000 \text{ A}$ (*Pickup Range* 0,01 I_n – 30 I_n , dengan *Step* 0,001 I_n)

Time Dial

Dipilih waktu operasi = 0,4 s

$$t = \frac{K \times T_d}{\beta \times \left[\left(\frac{I}{I_{EB}} \right)^{\alpha} - 1 \right]}$$
$$T_d = \frac{t \times \beta \times \left[\left(\frac{I}{I_{EB}} \right)^{\alpha} - 1 \right]}{K}$$

$$T_d = \frac{t \times \beta \times \left[\left(\frac{I_{sc} \text{ Max kontribusi GTG K2}}{\text{tap} \times CT_{primary}} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

$$T_d = \frac{0,4 \times 1,5 \times \left[\left(\frac{5020}{1 \times 3000} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

$$T_d = 0,12$$

$T_d \geq 0,12$ dipilih $T_d = 0,3$ (Range T_d 0,01-600, dengan step 0,01)

Instantaneous Pickup

$$I_{>>} \leq \frac{0,8 \times I_{sc} \text{ min kontribusi GTG K2}}{CT_{primer}} I_n$$

$$I_{>>} \leq \frac{0,8 \times 5000}{3000} I_n$$

$$I_{>>} \leq 1,33 I_n$$

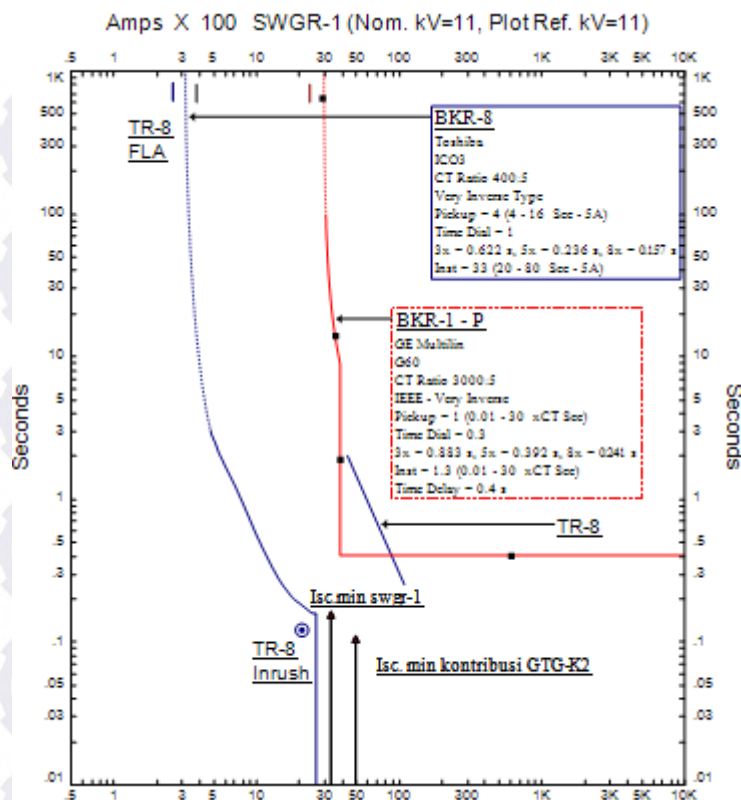
Dipilih $\text{Tap} = 1,3 I_n$ (Pickup Range $0,01 I_n - 30 I_n$, dengan Step $0,01 I_n$)

$$I_{>>} = 3900 \text{ A}$$

Time Delay

$$\text{Time delay} = 0,4 \text{ s}$$

Dengan menggunakan hasil perhitungan diatas, maka dapat di plotkurva arus waktukondisi *resetting* pada *software* simulasi. Dan hasilnya adalah seperti gambar 4.15



Gambar 4.15 Kurva koordinasi arus waktu *resetting* tipikal 3

Tabel 4.17 Data *resetting*

| Relay ID & Model | CT Ratio | Setting | |
|--------------------------|----------|----------------------------|--------------------|
| | | Curve Type | Very Inverse |
| BKR-8 Toshiba ICO3 | 400 : 5 | Pickup Range | 4-16 sec-5A |
| | | Pickup | 16 |
| | | Time Dial | 2 |
| | | Instantaneous Pickup Range | 20-80 sec-5A |
| | | Pickup | 60 |
| | | | |
| BKR-1 GE-Multilin | 3000 : 5 | Curve Type | Very Inverse |
| | | Pickup Range | 0.01-30 xCT Sec |
| | | Pickup | 1 |
| | | Time Dial | 0.3 |
| | | Instantaneous Pickup Range | 0.01-30 xCT Sec |
| | | Pickup | 1.3 |
| | | Delay | 0.4 |

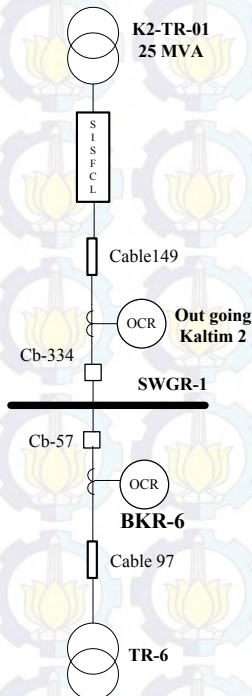
4.7.4 Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa Tipikal 4

Pada tipikal 4 terdapat 2 high voltage circuit breaker. Rele-rele yang dikoordinasikan adalah rele BKR-6 dan rele Out Going K-2. Tipikal 4 dapat dilihat pada gambar 4.16.

Tabel 4.18 Data *existing*

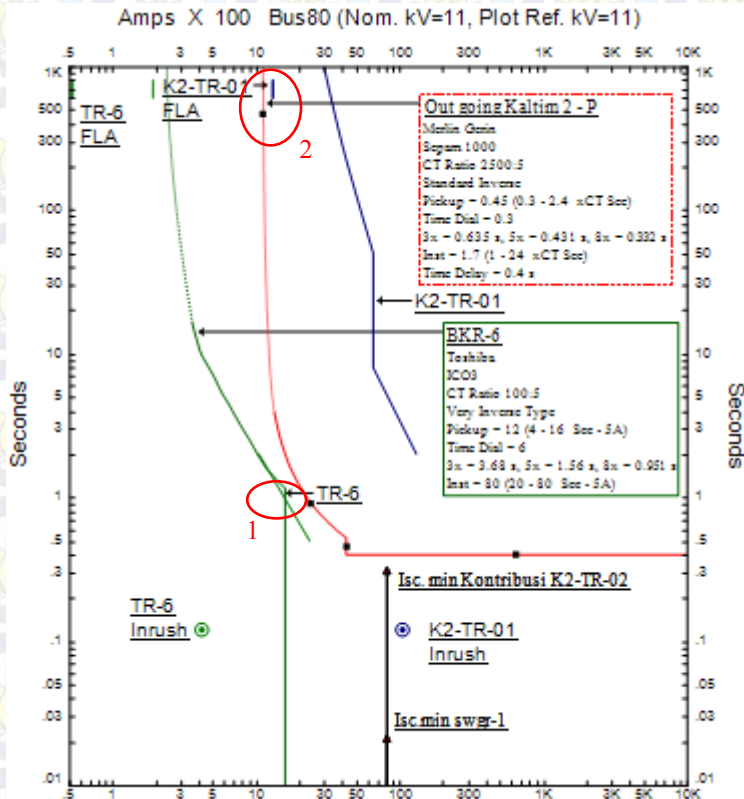
| Relay ID & Model | CT Ratio | Setting | |
|------------------------------------|----------|----------------------------|-------------------|
| | | Curve Type | Very Inverse |
| BKR-6 Toshiba ICO3 | 100 : 5 | Pickup Range | 4-16 sec-5A |
| | | Pickup | 12 |
| | | Time Dial | 6 |
| | | Instantaneous Pickup Range | 20-80 sec-5A |
| | | Pickup | 80 |
| | | | |
| Out Going Kaltim-2 Merlin Gerin | 3000 : 5 | Curve Type | Standar Inverse – |

| <i>Relay ID & Model</i> | <i>CT Ratio</i> | <i>Setting</i> | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------------------------|-------------|
| Sepam 1000 | | <i>Pickup Range</i> | 0,3-2,4xCT |
| | | <i>Pickup</i> | 0,45 |
| | | <i>Time Dial</i> | 0,3 |
| | | <i>Instantaneous Pickup Range</i> | 1 – 24 x CT |
| | | <i>Pickup</i> | 1,7 |
| | | <i>Delay</i> | 0,4 |



Gambar 4.16 Koordinasi rele tipikal 4

Pada koordinasi rele tipikal 4 masih perlu disempurnakan. Hal itu di tandai dengan lingkaran merah yang berada pada kurva arus waktu pada gambar 4.17.



Gambar 4.17 Kurva koordinasi arus waktu *existing* tipikal 4

Berikut ini merupakan keterangan pada lingkaran pada gambar 4.17 :

1. Berdasarkan kurva diatas pada rele BKR-6, kurva inverse menyentuh damage curve, dimana kondisi itu tidak boleh terjadi.

- Setting Pick up overcurrent dari rele out Going K2, berada dikiri dari FLA trafo, sehingga rele akan bekerja sebelum trafo mencapai beban penuh.

Dari analisis kurva *existing* dapat diketahui bahwa *setting* rele masih perlu disempurnakan agar bisa didapatkan koordinasi rele pengaman yang tepat. Perhitungan ulang *setting* rele adalah sebagai berikut :

☑ Rele BKR-6

| | |
|-----------------------|----------------------------|
| <i>Manufacturer</i> | : Toshiba |
| <i>Model</i> | : ICO3 |
| <i>Curve Type</i> | : <i>Very Inverse Time</i> |
| <i>CT ratio</i> | : 100 / 5 |
| Isc min bus SWGR-1 | : 3,36 kA |
| Isc max bus SWGR-1 | : 11,58 kA |
| FLA Primer Trafo TR-2 | : 52,49 A |

Time Overcurrent Pickup

$$\frac{1,05 \times \text{FLA Trafo TR-6}}{\text{CT ratio}} \leq \text{Iset} \leq \frac{0,8 \times \text{Isc.Min bus SWGR-1}}{\text{CT ratio}} \text{ A}$$

$$\frac{1,05 \times 52,49}{100/5} \text{ A} \leq \text{Iset} \leq \frac{0,8 \times 3360}{100/5} \text{ A}$$

$$2,75 \text{ A} \leq \text{Iset} \leq 134,4 \text{ A}$$

Dipilih Tap = 3 A (*PickupRange* 2A – 8 A)

$$\text{Iset} = 3 \times 100/5 = 60 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi = 0,1 s

$$t = \frac{K \times T_d}{\beta \times \left[\left(\frac{1}{\sqrt{IEB}} \right)^a - 1 \right]}$$

$$T_d = \frac{t \times \beta \times \left[\left(\frac{1}{\sqrt{IEB}} \right)^a - 1 \right]}{K}$$

$$T_d = \frac{t \times \beta \times \left[\left(\frac{\text{Isc Max SWGR-1}}{\text{tap} \times \text{CT primary}} \right)^a - 1 \right]}{13,5}$$

$$Td = \frac{0,1 \times 1,5 \times \left[\left(\frac{11580}{3 \times \frac{100}{5}} \right)^1 - 1 \right]}{13,5}$$

$$Td = 2,13$$

$Td \geq 2,13$ dipilih $Td = 3$ (Range Td 1-10, dengan *step* 1)

Instantaneous Pickup

$$I_{>>} \leq \frac{0,8 \times I_{sc} \text{ Min bus SWGR-1}}{CT \text{ ratio}}$$

$$I_{>>} \leq \frac{0,8 \times 3360}{100/5}$$

$$I_{>>} \leq 134,4A$$

Dipilih Tap = 40 (Pickup Range 20A – 80A, dengan Step 20A)

$$I_{>>} = 800 A$$

Time Delay

Time delay = 0,1 s

☑ Rele Out Going Kaltim-2

Manufacturer

: Merlin Gerin

Model

: Sepam 1000

Curve Type

: Standard Inverse

CT ratio

: 2500/ 1

Isc.min Kontribusi K2-TR-01

: 3,36 kA

Isc.max Kontribusi K2-TR-01

: 4,09 kA

FLA Sekunder Trafo K2-TR-01

: 1312 A

Time Overcurrent Pickup

$$\frac{1,05 \times FLA \text{ K2-TR-01}}{CT \text{ primer}} I_n \leq I_{set} \leq \frac{0,8 \times I_{sc} \text{ min kontribusi K2-TR-01}}{CT \text{ primer}} I_n$$

$$\frac{1,05 \times 1312}{2500} I_n \leq I_{set} \leq \frac{0,8 \times 3360}{2500} I_n$$

$$0,55 I_n \leq I_{set} \leq 1,07 I_n$$

Dipilih Tap = 0,6In (Pickup Range 0,3In – 2,4In, dengan Step 0,05 In)

$$I_{set} = 0,6 \times 2500 = 1500 A$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi = 0,7 s

$$t = \frac{K \times T_d}{\beta \times \left[\left(\frac{I}{I_{EB}} \right)^\alpha - 1 \right]}$$

$$T_d = \frac{t \times \beta \times \left[\left(\frac{I}{I_{EB}} \right)^\alpha - 1 \right]}{K}$$

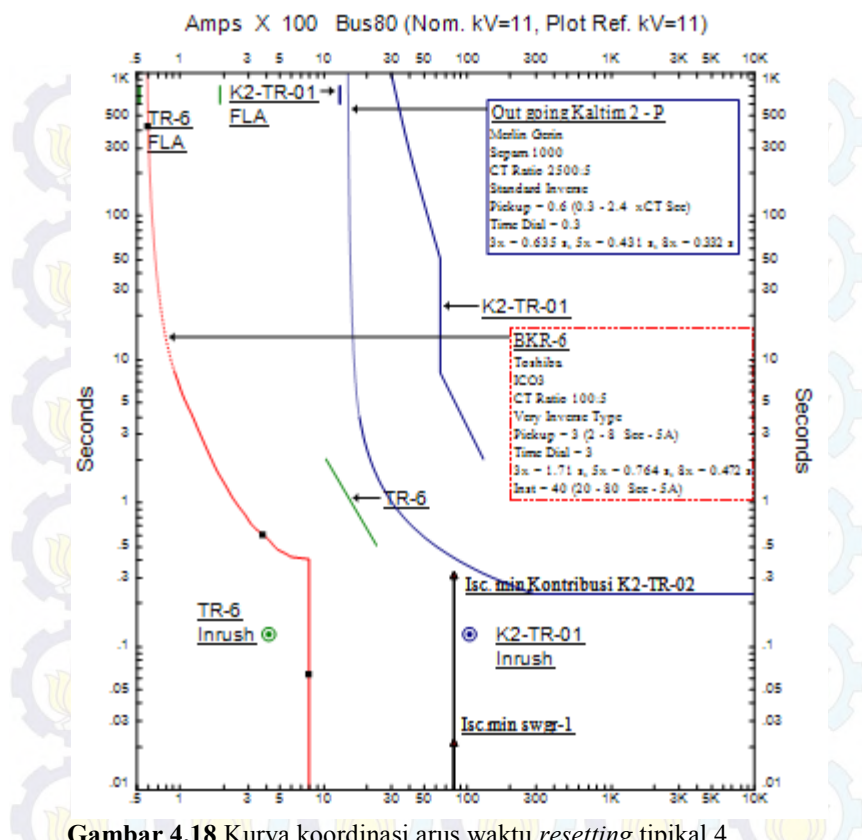
$$T_d = \frac{t \times \beta \times \left[\left(\frac{I_{sc} \text{ Max kontribusi K2-TR-02}}{\text{tap x CT primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{80}$$

$$T_d = \frac{0,4 \times 2,97 \times \left[\left(\frac{4090}{1 \times 2500} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,14$$

$T_d \geq 0,14$ dipilih $T_d = 0,3$ (Range T_d 0,01-600, dengan step 0,01)

Dengan menggunakan hasil perhitungan diatas, maka dapat di *plot* kurva arus waktu kondisi *resetting* pada *software* simulasi. Dan hasilnya adalah seperti gambar 4.18.



Gambar 4.18 Kurva koordinasi arus waktu *resetting* tipikal 4

Tabel 4.19 Data *resetting*

| Relay ID & Model | CT Ratio | Setting | |
|--|---------------------|-----------------------------------|---------------------|
| | | <i>Curve Type</i> | <i>Very Inverse</i> |
| BKR-6 Toshiba ICO3 | 100 : 5 | <i>Pickup Range</i> | 4-16 sec-5A |
| | | <i>Pickup</i> | 3 |
| | | <i>Time Dial</i> | 3 |
| | | <i>Instantaneous Pickup Range</i> | 20-80 sec-5A |
| | | <i>Pickup</i> | 40 |
| | | | |
| Out Going Kaltim-2 Merlin Gerin Sepam 1000 | 2500 : 5 | <i>Curve Type</i> | Standar Inverse - |
| | | <i>Pickup Range</i> | 0.3-2.4xCT Sec |
| | | <i>Pickup</i> | 0.6 |
| | | <i>Time Dial</i> | 0.3 |
| | | <i>Instantaneous Pickup Range</i> | - |
| | | <i>Pickup</i> | - |
| | | <i>Delay</i> | - |

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi kasus dan analisa koordinasi rele arus lebih akibat pemasangan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*) pada PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) yang telah dilakukan, maka diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Analisa hubung singkat pada PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) menunjukkan bahwa *switchgear* (swgr-1) mengalami kondisi *critical*. Pada kondisi konfigurasi *case 1* bahwa *switchgear* (swgr-1) pada kondisi *critical* dengan arus hubung singkat sebesar 67,41 asymm kA peak dari rating kemampuan switchgear (swgr-1) sebesar 37,8 Asymm kA peak.
2. Berdasarkan konfigurasi case 1, case 2 dan case 3 menunjukkan letak pemasangan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*) berada pada feeder transformator TR-K2-01 dan feeder generator GTG-K2 yang merupakan sumber kontribusi arus hubung singkat terbesar pada *switchgear* (swgr-1).
3. Pemasangan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*) dapat mengurangi arus hubung singkat pada switchgear (swgr-1) dari 67,41 asymm kA peak menjadi 35,751 Asymm kA peak sehingga peralatan tetap aman.
4. Dengan pemasangan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*) menunjukkan arus hubung singkat berkurang sehingga perlu di lakukan koordinasi proteksi rele arus lebih.
5. Pada PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II) terdapat beberapa rele yang hanya memiliki karakteristik *invers*, sehingga dengan pemasangan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter*) mengakibatkan menurunnya arus hubung singkat dan dapat mempengaruhi nilai *time dial*.

5.2 Saran

Dengan mempertimbangkan hasil studi yang telah dilakukan pada tugas akhir ini, ada beberapa saran yang dapat menjadi masukan kedepaannya, maka diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Semakin meningkatnya produksi dan adanya rencana penambahan plant dan pembangkit baru yang terintegrasi, maka penggunaan SISFCL (*Saturated Iron-core Superconducting Fault Current*

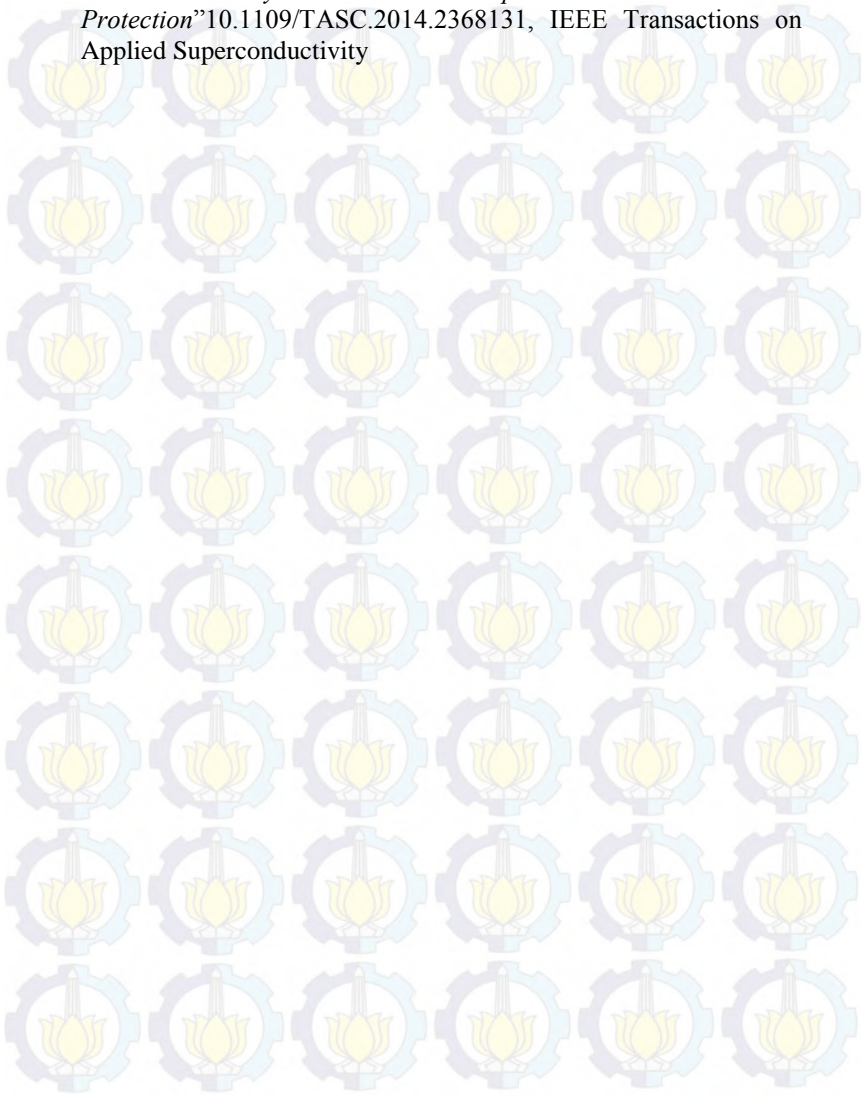
Limiters) dapat menjadi salah satu solusi untuk mengamankan peralatan dari arus hubung singkat yang besar.

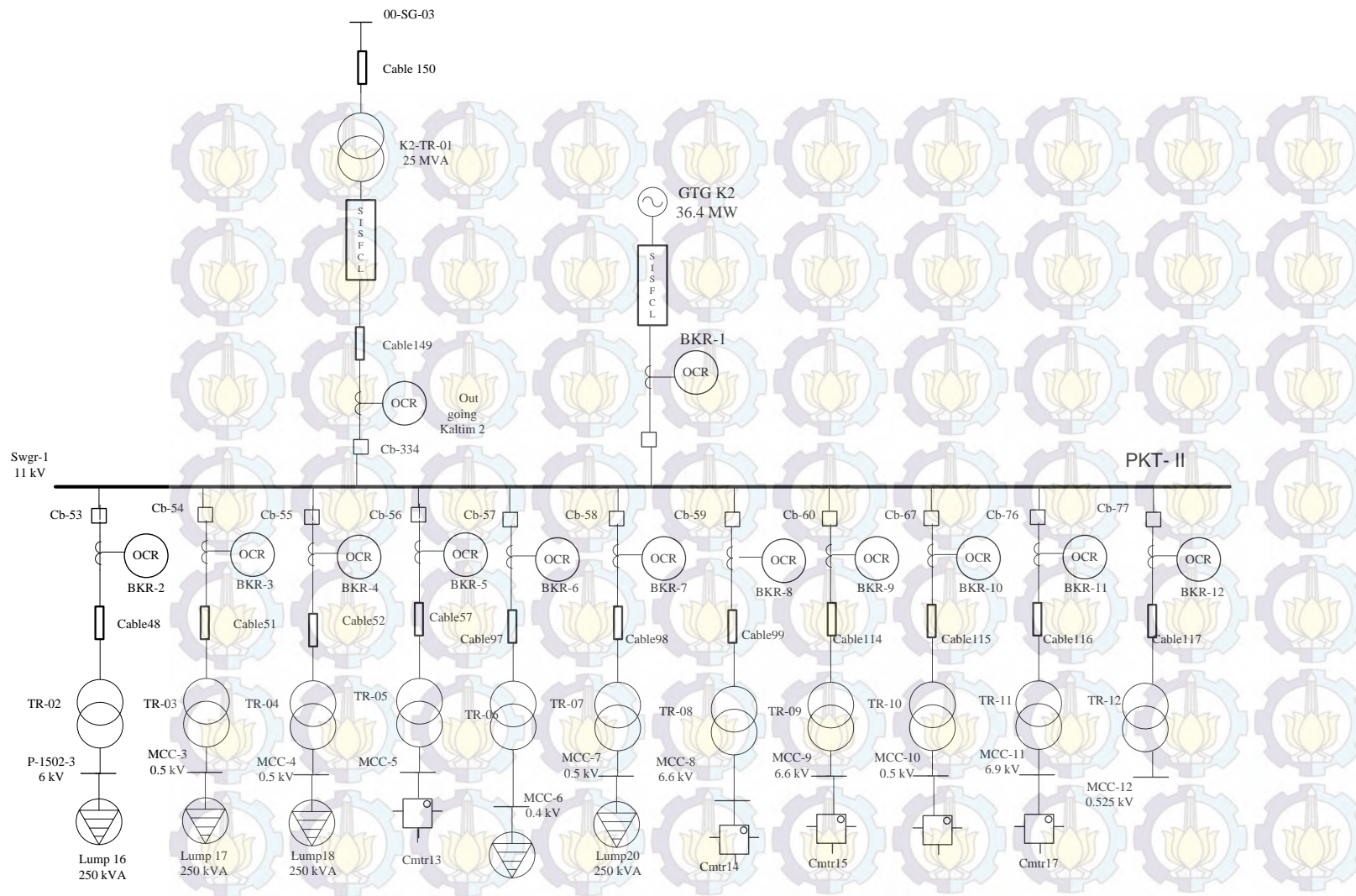
2. Pemasangan suatu alat pembatas arus hubung singkat dapat menyebabkan perubahan arus hubung singkat sehingga perlu dilakukan koordinasi proteksi rele arus lebih.

DAFTAR PUSTAKA

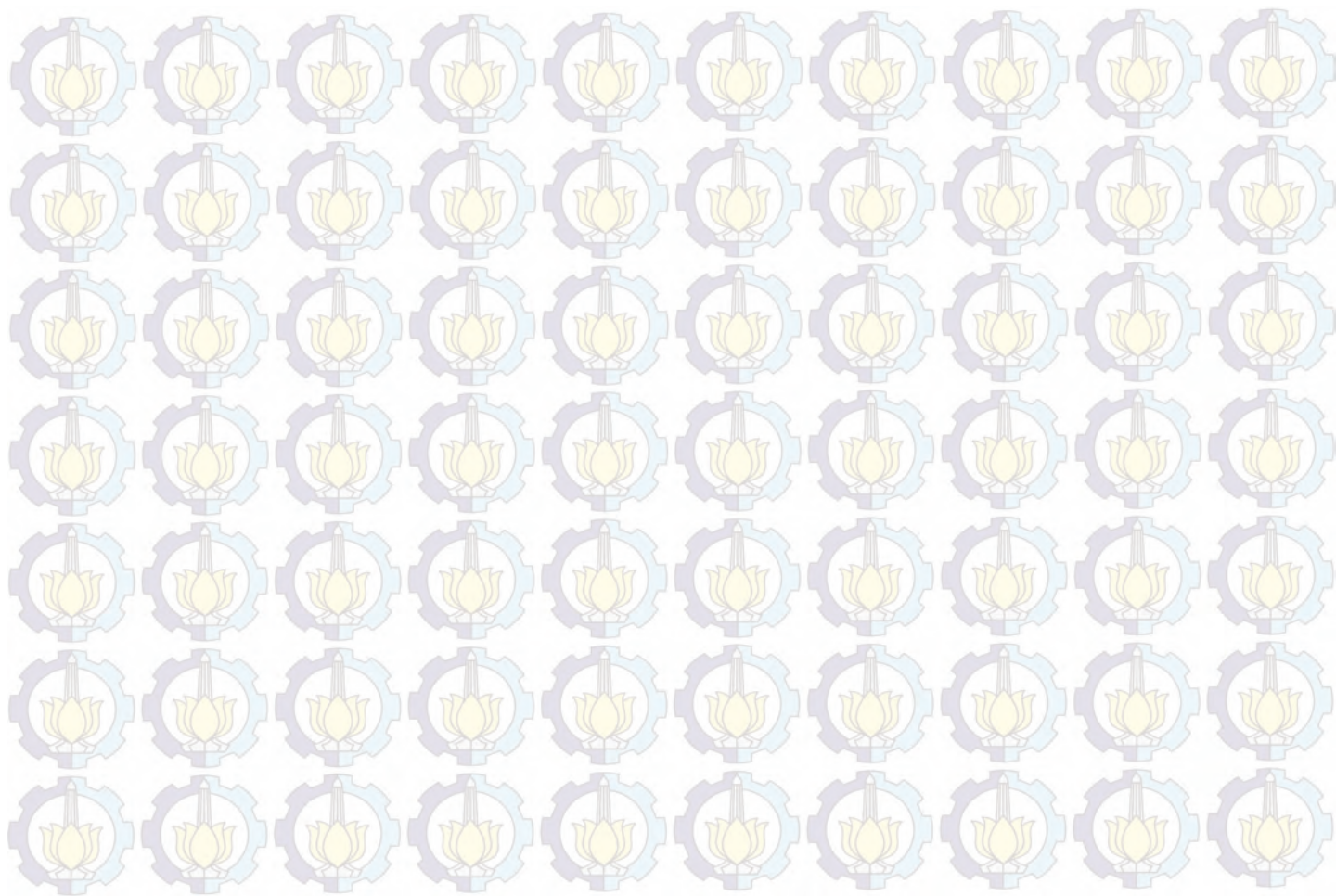
- [1] Soeprijanto, Adi "Kestabilan Sistem Tenaga Listrik, Diktat Kuliah Analisis Sistem Tenaga Listrik 2", Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
- [2] Wahyudi, "Diktat Kuliah Pengaman Sistem Tenaga Listrik", Teknik Elektro ITS, Surabaya, Bab 2, 2004
- [3] Lazar irwin "Electrical System Analysis and Design for Industrial Plant", McGraw-Hill Inc., USA, Ch, 1, 1980
- [4] Gurevich, Vladimir, "Electric Relays, Principle and application", CRCPress, USA, Ch. 10, 2006
- [5] IEEE std 242-2001, "IEEE Recommended Practice for Protection and Cordination of Industrial and Commercial Power System" The institute of Electrical and Electronic Engineering, Inc, New York, Ch 15, 2001.
- [6] Phadke, Arun G, dan Thorp, James S, "Computer relaying for Power System", John Wiley and Sons, Ltd., England, Ch.2, 2009
- [7] Préve, Christophe, "Protection for Electrical Network", ISTE Ltd., London, Ch. 7, 9, 2006
- [8] Instruction Manual "Multi-Functional Protective Relay with Bay Controller 7SJ62 V4.0/V4.1" Siemens. 1999
- [9] Service Manual Type MCGG "Overcurrent Relays for Phase and Earth Fault" Alstom
- [10] Protective Relay Setting Proposal " 2 x 35 MW Tonasa Power Plant" Siemens. 2011
- [11] Hong Hui, "DC Magnetization System for a 35 kV/90 MVA Superconducting Saturated Iron-Core Fault Current Limiter", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 19, NO. 3, JUNE 2009
- [12] Wang Haizhen, "Saturated Iron Core Superconducting Fault Current Limiter", International Conference on Electric Power Equipment (IEEE) – Switching Technology – Xi'an – China, 1st 2011
- [13] Xin Ying, "Overcurrent Protection Coordination in a Power Distribution Network With the Active Superconductive Fault Current Limiter", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 24, NO. 5, OCTOBER 2014

- [14] Li Bin, “*Application studies on the Active SISFCL in Electric Transmission System and its Impact on Line Distance Protection*”10.1109/TASC.2014.2368131, IEEE Transactions on Applied Superconductivity

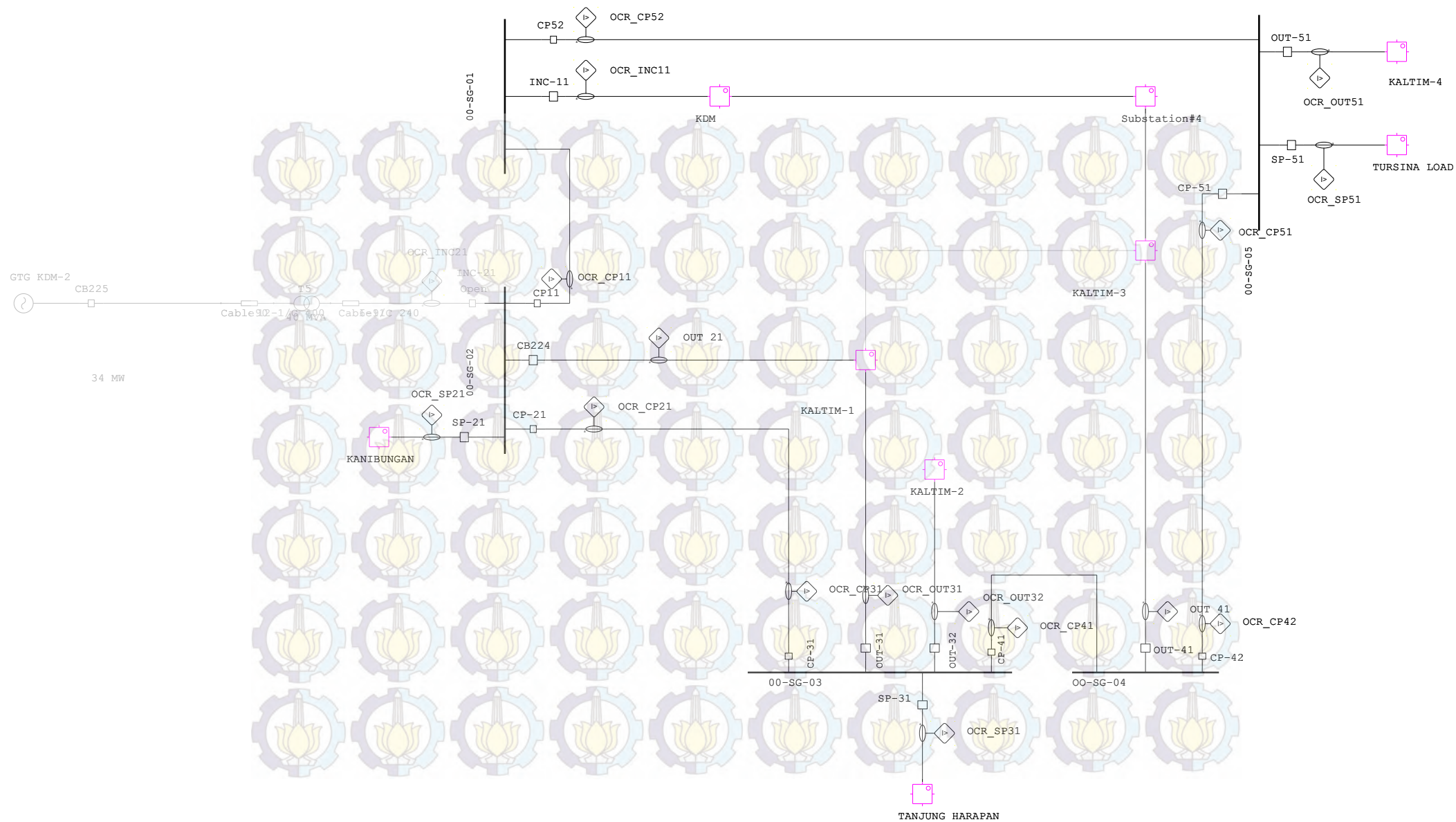




Gambar Single Line Diagram Kelistrikan PT. Pupuk Kalimantan Timur II (PKT II)



One-Line Diagram - OLV1 (Star Sequence-of-Operation)



RIWAYAT PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Muhammad Firman Setiawan. Lahir di kota pahlawan yaitu Surabaya pada tanggal 18 Agustus 1992. Penulis mengawali pendidikan di SDN Karah II Surabaya, kemudian melanjutkan ke SMPN 32 Surabaya pada tahun 2004. Setelah lulus dari SMP ,pada tahun 2007 penulis melanjutkan pendidikannya ke SMAN 15Surabaya. Kemudian setelah lulus dari SMA pada tahun 2010, penulis melanjutkan studi yang lebih tinggi yakni Diploma III Elektro komputer kontrol di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Setelah lulus tahun 2013 dengan memegang gelar AMD penulis melanjutkan studi sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jurusan Elektro, Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga.